

TUGAS AKHIR - ME184834

DESAIN SISTEM MONITORING ARUS SACRIFICIAL ANODE CATHODIC PROTECTION MENJADI IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION PADA PIPELINE GAS PT PELINDO ENERGI LOGISTIK, BENOA

Isa Hanif Maulana
NRP 04211640000029

Dosen Pembimbing
Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



TUGAS AKHIR - ME184834

**DESAIN SISTEM MONITORING ARUS SACRIFICIAL
ANODE CATHODIC PROTECTION MENJADI
IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION
PADA PIPELINE GAS PT PELINDO ENERGI LOGISTIK,
BENOA**

Isa Hanif Maulana
NRP 04211640000029

Dosen Pembimbing
Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



FINAL PROJECT - ME184834

DESIGN CURRENT MONITORING SYSTEM OF GAS PIPELINE PROTECTION FROM SACRIFICIAL ANODE CATHODIC PROTECTION TO IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION ON PT PELINDO ENERGI LOGISTIK, BENOA

Isa Hanif Maulana
NRP 04211640000029

Supervisors
Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.
Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.

DEPARTEMENT OF MARINE ENGINEERING
FAKULTAS MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN SISTEM MONITORING ARUS SACRIFICIAL ANODE CATHODIC PROTECTION MENJADI IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION PADA PIPELINE GAS PT PELINDO ENERGI LOGISTIK, BENOA

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System (MEAS)*

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

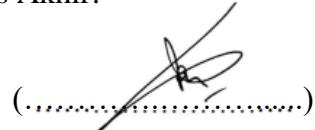
Oleh:

Isa Hanif Maulana

NRP. 04211640000029

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc.
NIP. 1979 0327 2003 12 1001



(.....)

Ir. Sardono Sarwito, M.Sc.
NIP. 1960 0319 1987 01 1001



(.....)

SURABAYA

Juli 2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN SISTEM *MONITORING ARUS SACRIFICIAL ANODE CATHODIC PROTECTION* MENJADI *IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION* PADA PIPELINE GAS PT PELINDO ENERGI LOGISTIK, BENOA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Penulis:

Isa Hanif Maulana

NRP. 04211640000029

Disetujui Oleh,
Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Beny Canyone, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 197903192008011008

SURABAYA

AGUSTUS, 2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DESAIN SISTEM MONITORING ARUS SACRIFICIAL ANODE CATHODIC PROTECTION MENJADI IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION PADA PIPELINE GAS PT PELINDO ENERGI LOGISTIK, BENOA

Nama Mahasiswa : Isa Hanif Maulana
NRP : 04211640000029
Dosen Pembimbing 1 : Indra Ranu Kusuma, S.T., M. Sc.
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Sardono Sarwito, M. Sc.

ABSTRAK

Korosi menjadi peristiwa yang tidak dapat dihindari oleh setiap material logam. Korosi dapat terjadi kapan saja dan dimana saja. Korosi tidak dapat dicegah akan tetapi laju korosinya dapat diperlambat. Pipa berbahan dasar besi atau baja menjadi salah satu target dari korosi. Terlebih lagi jika pipa tersebut berada di bawah media tanah maupun air laut yang mengadung kadar salinitas yang tinggi. Hal tersebut dapat merusak struktur permukaan pipa, membuat permukaan pipa semakin menipis, pipa menjadi bocor, dan timbulah kerugian bagi perusahaan. Oleh karena itu, dibutuhkan tindakan untuk melindungi dan memperlambat laju korosi dari sebuah material logam. Terdapat 2 metode, diantaranya: *Sacrificial Anode Cathodic Protection* (SACP) dan *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP). Penelitian ini membahas mengenai desain sistem monitoring arus pada metode *impressed current cathodic protection* serta menganalisis dampak penggunaan dari segi ekonomi dan teknik. Desain sistem monitoring arus ini menggunakan warna lampu sebagai indikator. Warna lampu hijau menunjukkan bahwa arus proteksi yang megalir pada *pipeline* sudah sesuai dengan standar, sedangkan warna kuning sebaliknya. Setelah melakukan analisis dari segi ekonomi dan teknik, diketahui bahwa penggunaan metode *impressed current cathodic protection* menjadi pilihan yang tepat sebagai metode untuk mendistribusikan gas daripada *sacrificial anode cathodic protection*. Hal tersebut dikarenakan metode *impressed current cathodic protection* lebih ekonomis sebesar Rp 337.051.724, lebih efisien dalam melindungi *pipeline* dengan struktur yang luas, dan juga dapat dikontrol & dimonitoring secara *realtime*.

Kata Kunci: *Pipeline, Korosi, Impressed Current Cathodic Protection, Sistem Monitoring, Sacrificial Anode Cathodic Protection*

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DESIGN MONITORING SYSTEM OF GAS PIPELINE PROTECTION FROM SACRIFICIAL ANODE CATHODIC PROTECTION TO IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION ON PT PELINDO ENERGI LOGISTIK, BENOA

Nama Mahasiswa : Isa Hanif Maulana
NRP : 04211640000029
Dosen Pembimbing 1 : Indra Ranu Kusuma, S.T., M. Sc.
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Sardono Sarwito, M. Sc.

ABSTRACT

Corrosion becomes an event that cannot be avoided by every metal material. Corrosion can occur anytime and anywhere. Corrosion cannot be prevented but the rate of corrosion can be slowed. Pipelines made from iron or steel become one of the targets of corrosion. Moreover, if the pipe is under the media of land and sea water that contains high salinity levels. This can damage the surface structure of the pipe, such as: make the surface of the pipe thinner, the pipe will leak, and there will be economic loss for the company. Therefore, action is needed to protect and slow down the corrosion rate of a metal material. There are 2 methods, which is: Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP) and Impressed Current Cathodic Protection (ICCP). This study discusses about design monitoring system of gas pipeline for impressed current cathodic protection and analyzes the impact of the use in terms of techno-economic. The design of monitoring system uses the color of the lamp as an indicator. The color of the green light indicates that the protection current flowing to the pipe is in accordance with the standard, while the yellow color is vice versa. After analyzing techno-economic, it is known that the use of the impressed current cathodic protection method is the right choice as a method for distributing gas rather than sacrificial anode cathodic protection. That is because the impressed current cathodic protection method can saving the fund until Rp. 337.051.724, is more efficient in protecting pipeline for large structures, and can also be controlled & monitored in real time.

Kata Kunci: *Pipeline, Corrosion, Impressed Current Cathodic Protection, Monitoring System, Sacrificial Anode Cathodic Protection*

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur Saya curahkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta’ala karena atas segala limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Desain Sistem Monitoring Arus Sacrificial Anode Cathodic Protection menjadi Impressed Current Cathodic Protection pada Pipeline Gas PT Pelindo Energi Logistik, Benoa.**

Dalam proses menyelesaikan tugas akhir ini penulis mendapatkan banyak dukungan, baik berupa motivasi dan materi dari berbagai pihak mulai dari tahap awal penyusunan hingga akhir sehingga tugas akhir dapat terselesaikan. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Tri Susanto dan Rarik Sulistin selaku orangtua penulis yang selalu ada untuk memberikan semangat dan bantuan berupa do'a, materi, maupun motivasi.
2. Bapak Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc. dan Ir. Sardono Sarwito, M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis atas bimbingan ilmu dan arahan yang telah diberikan kepada penulis
3. Bapak Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D selaku kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan, FTK, ITS dan juga sebagai dosen wali yang selalu memberi semangat dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan.
4. M. Rifki Abdillah selaku rekan penulis yang telah banyak memberikan bantuan dalam penyelesaian tugas akhir penulis.
5. Kepada seluruh teknisi, member dan grader Laboratorium *Marine Electrical and Automation System* (MEAS) yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.
6. Keluarga besar Voyage‘16 yang telah menjadi keluarga yang selalu memberikan dukungan serta semangat selama penulis menempuh pendidikan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	VII
LEMBAR PENGESAHAN.....	IX
ABSTRAK	XI
ABSTRACT	XIII
KATA PENGANTAR.....	XV
DAFTAR ISI.....	XVII
DAFTAR GAMBAR	XIX
DAFTAR TABEL.....	XX
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Korosi	5
2.2. Laju Korosi	7
2.3. Jenis Korosi	8
2.3.1. Korosi Merata.....	8
2.3.2. Korosi Sumur	9
2.3.3. Korosi Erosi.....	10
2.3.4. Korosi Galvanis.....	11
2.3.5. Korosi Tegangan	11
2.3.6. Korosi Celah.....	12
2.3.7. Korosi Mikrobiologi.....	13
2.3.8. Korosi Antar Butir.....	13
2.4. Metode Pencegahan Korosi	14
2.4.1. Modifikasi Rancangan.....	14
2.4.2. Modifikasi Lingkungan	14

2.4.3. Pemberian Lapisan Pelindung	15
2.4.4. Pemilihan Bahan	18
2.4.5 Proteksi Katodik	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1. Alur Penelitian.....	23
3.2. Pengumpulan Data.....	23
3.3. Perhitungan Metode ICCP	24
3.4. Desain Monitoring Arus ICCP	26
3.5. Simulasi Desain Monitoring Arus ICCP	27
3.6. Perhitungan Metode SACP.....	27
3.7 Analisa Data & Kajian Teknik dan Ekonomi	28
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Deskripsi Umum.....	29
4.1.1 Data <i>Pipeline</i>	29
4.1.2 Data Anoda.....	29
4.1.3 Data Kabel.....	29
4.2 Perhitungan Metode <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>	30
4.3 Desain Sistem Monitoring <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>	
35	
4.4 Perhitungan Metode <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i>	40
4.5 Kajian Penggunaan Impressed Current Cathodic Protection	42
4.5.1 Segi Ekonomi	42
4.5.2 Segi Teknik	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN A	55
LAMPIRAN B	59
BIODATA PENULIS	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Korosi pada pipa	5
Gambar 2.2 Komponen Reaksi Elektrokimia	6
Gambar 2.3 Struktur Korosi Merata	8
Gambar 2.4 Korosi Merata	9
Gambar 2.5 Struktur Korosi Sumur.....	9
Gambar 2.6 Korosi Sumur	10
Gambar 2.7 Stuktur Korosi Erosi	10
Gambar 2.8 Korosi Erosi	11
Gambar 2.9 Struktur Korosi Galvanis	11
Gambar 2.10 Korosi Galvanis	11
Gambar 2.11 Struktur Korosi Tegangan.....	12
Gambar 2.12 Korosi Tegangan.....	12
Gambar 2.13 Struktur Korosi Celah	12
Gambar 2.14 Korosi Celah	13
Gambar 2.15 Struktur Korosi Antar Butir	13
Gambar 2.16 Korosi Antar Butir	14
Gambar 2.17 Deret Galvanik	19
Gambar 2.18 Mekanisme Anoda Korban	20
Gambar 2.19 Mekanisme Arus Tanding.....	21
Gambar 4.1 Diagram Blok Sistem Monitoring Arus <i>Impressed Current</i>	35
Gambar 4.2 Diagram Sistem Monitoring pada Matlab.....	36
Gambar 4.3 Grafik Tegangan dengan input arus 0,3828 A.....	37
Gambar 4.4 Grafik Tegangan dengan input arus 0,3925 A	38
Gambar 4.5 Grafik Tegangan dengan input arus 0,3752 A	38
Gambar 4.6 Screen 1, User Interface Sistem Monitoring Arus <i>Impressed Current</i>	39
Gambar 4.7 Screen 2, User Interface Sistem Monitoring Arus <i>Impressed Current</i>	40
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Biaya antar Metode	47

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Keadaan Minyak Bumi di Indonesia	1
Tabel 2.1 Tingkatan Ketahanan Korosi Logam berdasarkan Laju Korosi.	7
Tabel 4.1 Perhitungan Luas Proteksi Pipa.....	30
Tabel 4.2 Perhitungan Arus Proteksi Pipa.....	31
Tabel 4.3 Perhitungan Kebutuhan Anoda.....	32
Tabel 4.4 Perhitungan Jarak Pemasangan Antar Anoda.....	33
Tabel 4.5 Biaya Pengadaan Metode <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>	43
Tabel 4.6 Biaya Instalasi Metode <i>Impressed Current Cathodic Protection</i> .44	44
Tabel 4.7 Biaya Operasional Metode <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>	44
Tabel 4.8 Biaya Pengadaan Metode <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i>	45
Tabel 4.9 Biaya Instalasi Metode <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i> ...46	46
Tabel 4.10 Biaya Operasional Metode <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i>	47

BAB I **PENDAHULUAN**

1.1. Latar Belakang

Sejak tahun 1974, cadangan minyak bumi di Indonesia terus menerus menurun karena kebutuhan BBM yang terus meningkat. Ketika cadangan minyak bumi pada tahun 2000 mencapai 5123 metrik barel (MB) menurun menjadi 4083 MB pada tahun 2007, konsumsi minyak bumi yang pada tahun 2000 hanya 996,4 (ratus barel/hari) meningkat menjadi 1128 (ribu barel/hari) (Tabel 1.1) (Purwatiningsih & Masykur, 2012). Hal tersebut mengindikasikan bahwa cadangan minyak bumi di Indonesia mengalami penurunan dan berkurangnya riset mengenai sumur-sumur baru yang mengandung cadangan minyak bumi.

Tabel 1.1 Keadaan Minyak Bumi di Indonesia
(Sumber: OPEC, 2007)

Keadaan Minyak Bumi di Indonesia	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Produksi Minyak	1272,5	1214,2	1125,4	1139,6	1094,4	1027,1	996,5	906,5
Konsumsi Minyak	996,4	1026	1075,4	1112,9	1143,7	1176,2	1032,3	1128
Impor Minyak Mentah	219,1	326	327,7	306,7	330,1	342,0	372,8	396,9
Eksport Minyak Mentah	622,5	599,2	639,9	433	412,7	523,6	505,2	511
Kapasitas Pengilangan	1057	1057	1057	1057	1055,5	1055,5	1052,1	1052,1
Output Pengilangan	968,2	1006,1	1002,4	944,4	1011,6	903,1	1001,3	1007,2
Cadangan Minyak (MB)*	5123	5095	4722	4320	4301	4210	4104	4083

Dampak yang dirasakan Indonesia ketika hal tersebut terjadi adalah timbulnya krisis energi. Salah satu cara untuk menghindarinya dengan melakukan eksplorasi dan survei lebih dalam lagi mengenai cadangan energi selain minyak bumi. Setelah dilakukan riset, gas alam menjadi pilihan dalam menggantikan minyak bumi.

Gas bumi termasuk dalam energi yang tidak bisa diperbarui karena terbentuk dari fosil yang terpendam jutaan tahun lamanya. Umumnya, gas bumi dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk PLTU dan kendaraan kendaraan bermotor. Cadangan gas bumi dalam jumlah yang banyak, menjadikan Indonesia menempati urutan ke-14 sebagai pemilik cadangan gas bumi terbesar di dunia (Setiawan, 2016).

Cadangan gas bumi yang melimpah sering ditemukan di lokasi-lokasi yang jauh dari konsumen, sebut saja Kepulauan Natuna yang terletak pada ujung utara Indonsia dengan jarak tempuh lebih dari 1.250 km dari Jakarta. Disana sangat banyak tersimpan cadangan minyak dan gas bumi, yang digadang-gadang menjadi tempat cadangan gas alam terbesar di Dunia (Purwatiningsih & Masykur, 2012).

Kegiatan eksplorasi dan eksploitasi cadangan migas dalam skala besar menjadikan perusahaan-perusahaan migas memilih untuk mengelola dan mendistribusikan produknya menggunakan pipa. Material besi dan baja yang dipilih dalam pembuatan pipa, karena diharapkan dapat menghasilkan struktur pipa yang kuat.

Karena jarak yang ditempuh dari sumur migas hingga konsumen begitu panjang, menjadikan saluran pipa melewati berbagai kondisi, seperti laut dataran rendah, lembah, hingga di dalam tanah dan sangat besar kemungkinan bahwa pipa mengalami korosi. Korosi menjadi salah satu faktor kerusakan pada pipa. Korosi adalah sebuah peristiwa berkurangnya kualitas dari sebuah material karena terjadinya reaksi elektrokimia dengan lingkungannya (Trethewey & Chamberlain, 1988).

Korosi dapat menyebabkan berkurangnya ketebalan sebuah material dan lama kelamaan dapat menjadi kebocoran. Puncaknya dapat membuat perusahaan mengalami kerugian (Irawan, 2016).

Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah perlindungan yang bisa melindungi pipa dari korosi. Banyak cara yang dapat digunakan untuk melindungi pipa dari korosi, salah satunya berupa proteksi anoda dan katoda. Proteksi ini dibagi menjadi 2 berdasarkan mekanismenya, yaitu: metode *Sacrificial Anodes Cathodic Protection* (SACP) dan *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP).

Ditinjau dari keunggulannya, ICCP merupakan metode yang cocok diaplikasikan karena dapat menurunkan laju korosi dilingkungan yang kadar salinitasnya tinggi dengan luasan yang besar. Dilain sisi, ICCP juga membutuhkan sistem monitoring dan controlling sebagai bentuk perawatan dan juga untuk memastikan bahwa ICCP berjalan dengan normal.

Pada saat ini, Metode yang digunakan oleh PT Pelindo Energi Logistik Cabang Benoa adalah metode SACP. Pada penilitian ini, peneliti menawarkan untuk mendesain sistem monitoring arus ICCP pada pipeline PT Pelindo Energi Logistik, Benoa. Mengganti SACP menjadi ICCP karena metode ICCP dapat memproteksi sistem yang lebih besar, seperti pipeline (Evitts, 2012).

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam perancangan desain sistem monitoring *impressed current cathodic protection*:

1. Bagaimana desain sistem monitoring arus SACP menjadi ICCP pada PT Pelindo Energi Logistik, Benoa?
2. Bagaimana dampak perubahan sistem monitoring arus dari SACP menjadi ICCP pada *pipeline* PT Pelindo Energi Logistik, Benoa?

1.3. Tujuan Penelitian

Berikut adalah tujuan penelitian pada perancangan desain sistem monitoring *impressed current cathodic protection*:

1. Menentukan desain sistem monitoring arus SACP menjadi ICCP pada pipeline PT Pelindo Energi Logistik, Benoa.
2. Mengetahui dampak perubahan desain sistem monitoring arus ICCP pada pipeline PT Pelindo Energi Logistik, Benoa.

1.4. Batasan Masalah

Berikut ini adalah batasan masalah yang digunakan dalam penelitian agar mempermudah peneliti untuk menyelesaikan tugas akhir dan pembahasan tidak melebar kemana-mana:

1. Penelitian ini hanya meneliti mengenai desain sistem monitoring arus dari ICCP.
2. Peristiwa korosi yang diteliti dalam penelitian ini adalah korosi eksternal.
3. Objek yang digunakan merupakan Pipeline PT Pelindo Energi Logistik Cabang Benoa.

4. Tidak dilakukan pembuatan *programming* seperti *user interface* pada proses mendesain sistem monitoring

1.5. Manfaat Penelitian

1. Menambah pengetahuan bagi peneliti mengenai proses terjadinya korosi dan cara pencegahannya.
2. Sebagai masukan desain sistem monitoring arus SACP menjadi ICCP kepada PT Pelindo Energi Logistik, Benoa.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Korosi

Korosi merupakan salah satu permasalahan yang sering terjadi pada struktur pipa. Terlebih jika pipa tersebut ditanam dalam tanah atau air yang semakin meningkatkan laju korosi dari struktur pipa tersebut. Korosi adalah sebuah peristiwa menurunnya mutu dari sebuah logam akibat bersinggungan dengan lingkungan sekitarnya yang lama-kelamaan dapat merusak struktur logam. Korosi dapat terjadi pada seluruh atau hanya sebagian permukaan logam (Irwanto et al., 2013). Banyak orang menyebut bahwa karat sama halnya dengan korosi. Sebenarnya karat adalah bagian dengan korosi, hanya saja korosi terjadi pada semua struktur logam, sedangkan karat hanya terjadi pada struktur besi (Trethewey & Chamberlain, 1988).

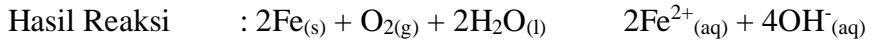
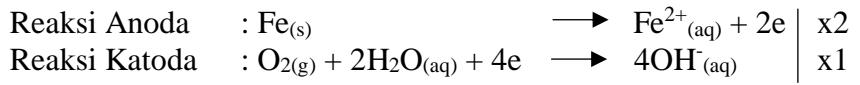


Gambar 2.1 Korosi pada pipa

Sumber: jagad.id

Korosi terjadi karena adanya reaksi elektrokimia pada permukaan logam. Reaksi elektrokimia merupakan peristiwa perpindahan elektron oleh logam. Perpindahan elektron terjadi karena adanya reaksi redoks pada larutan elektrolit, hal tersebut menjadi landasan teori reaksi elektrokimia. Reaksi redoks terdiri dari reaksi reduksi dan oksidasi yang berlangsung dalam waktu yang sama. Reaksi reduksi merupakan reaksi penerimaan elektron, sedangkan reaksi oksidasi adalah reaksi pelepasan elektron (Harahap, 2016).

Berikut adalah sebuah contoh dari reaksi reduksi-oksidasi yang terjadi pada besi dengan oksigen:



Dari persamaan reaksi redoks di atas, diketahui bahwa material besi berperan sebagai reduktor dalam reaksi anoda karena besi melakukan pelepasan elektron dan menjadi tempat terjadinya korosi, sedangkan oksigen berperan sebagai oksidator karena melakukan penerimaan elektron dari besi.

Menurut Trethewey et al., 1988, menyatakan bahwa terdapat 4 faktor yang berperan penting dalam mempengaruhi terjadinya reaksi elektrokimia. Di bawah ini merupakan penjabaran dari 4 faktor, yaitu:

a. Anoda

Menjadi tempat terjadinya oksidasi dan melepaskan elektron-elektron pada logam, serta menjadi tempat terjadinya korosi.

b. Katoda

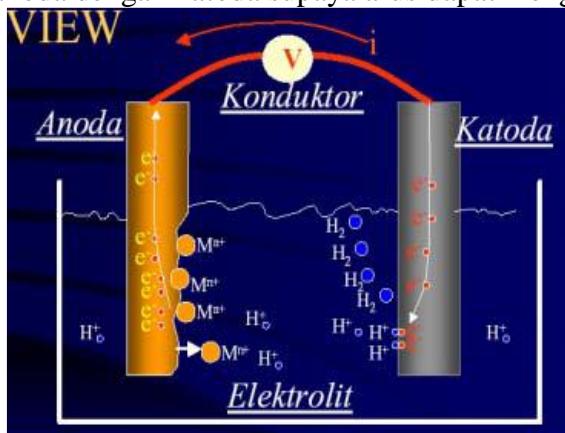
Menjadi tempat terjadinya reduksi dan menangkap elektron-elektron dan biasanya jarang terjadi korosi.

c. Larutan Elektrolit

Sebuah media yang dapat menghantarkan listrik dari anoda menuju katoda sehingga terbentuk siklus aliran arus listrik.

d. Hubungan Listrik

Pada reaksi redoks harus terdapat penghubung listrik (konduktor) antara anoda dengan katoda supaya arus dapat mengalir.



Gambar 2.2 Komponen Reaksi Elektrokimia
Sumber: (Wahyuningsih et al., 2017)

2.2. Laju Korosi

Kecepatan rambat dari penurunan kualitas mutu sebuah logam terhadap waktu merupakan definisi dari laju korosi. Satuan yang digunakan dalam perhitungan laju korosi adalah mm/th (standar internasional) atau menggunakan mill/year (mpy, standar British). Setiap logam mempunyai tingkat ketahanan terhadap korosi yang berbeda-beda, umumnya berkisar antara 1 hingga 200 mpy.

Laju korosi dapat dihitung dengan menggunakan rumus di bawah ini (NACE Standard, 2005):

$$CR = \frac{365 \times 1000 \times W}{\rho \times A \times T \times (2,54)^3}$$

Dimana:

- CR = Laju Korosi (mpy)
- W = Berat (kg)
- ρ = Densitas Logam (gram/cm³)
- A = Luas Permukaan Logam (m²)
- T = Waktu Pengujian (hour)

Berikut merupakan tabel pengklasifikasian dari tingkat ketahanan logam berdasarkan laju korosinya (Afandi et al., 2015).

Tabel 2.1 Tingkatan Ketahanan Korosi Logam berdasarkan Laju Korosi.

Relative Corrosion Resistance	Approximate Metric Equivalent				
	mpy	mm/yr	$\mu\text{m}/\text{yr}$	nm/yr	pm/sec
<i>Outstanding</i>	< 1	< 0,02	< 25	< 2	< 1
<i>Excellent</i>	1 – 5	0,02 – 0,1	25 – 100	2 – 10	1- 5
<i>Good</i>	5 – 20	0,1 – 0,5	100 – 500	10 – 50	5 – 20
<i>Fair</i>	20 – 50	0,5 – 1,0	500 – 1000	50 – 100	20 – 50
<i>Poor</i>	50 – 200	42125	1000 – 5000	150 – 500	50 – 200
<i>Unacceptable</i>	> 200	> 5	> 5000	> 500	> 200

Menurut Trethewey et al., 1988, cepat lambatnya laju reaksi dipengaruhi oleh beberapa faktor di sekitar lingkungannya, diantaranya:

- a. Kelembaban Relatif
- b. Temperatur
- c. pH
- d. Konsentrasi Oksigen
- e. Bahan Pengotor Padat atau Terlarut
- f. Konsentrasi
- g. Kecepatan Elektrolit

2.3. Jenis Korosi

Korosi dapat terjadi dalam berbagai jenis, bergantung pada keadaan lingkungan. Berikut merupakan penjelasan dari berbagai jenis korosi yang dapat terjadi:

2.3.1. Korosi Merata

Korosi merata menjadi salah satu bentuk korosi yang umum terjadi pada logam dan karena itulah korosi ini dapat disebut juga korosi general. Korosi ini terjadi secara menyeluruh pada struktur logam yang komposisinya sama.

Dengan adanya komposisi logam yang sama dapat menyebabkan terjadinya korosi pada seluruh permukaan logam dengan intensitas yang sama. Efek dari korosi ini adalah berkurangnya ketebalan logam yang merata. Coating menjadi salah satu cara untuk mencegah korosi merata (Irwanto et al., 2013).



Gambar 2. 3 Struktur Korosi Merata

Sumber: Hilti Corrosion Book



Gambar 2.4 Korosi Merata

Sumber: theconstructor.org/

2.3.2. Korosi Sumur

Penyebab dari terjadinya korosi sumur dipengaruhi oleh faktor eksternal dan internal. Faktor eksternal yang mempengaruhinya adalah lingkungan yang terdapat unsur kimia didalamnya, seperti asam klorida. Sedangkan faktor internal yang mempengaruhinya adalah adanya struktur komposisi pada logam yang heterogen.

Dampak dari peristiwa ini adalah tekstur permukaan logam menjadi lebih kasar karena timbulnya korosi yang berbentuk sumur. Cara untuk mencegah korosi sumur adalah memilih bahan yang komposisinya homogen, menggunakan inhibitor, dan mengcoating dari zat kimia yang agresif (Irwanto et al., 2013).



Gambar 2.5 Struktur Korosi Sumur

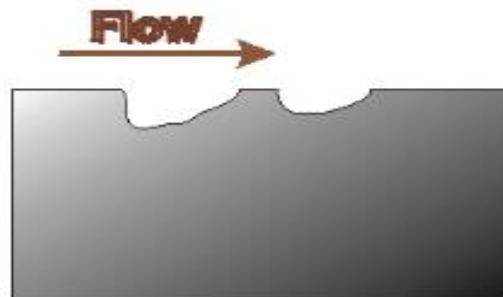
Sumber: Hilti Corrosion Handbook



Gambar 2.6 Korosi Sumur
Sumber: theconstructor.org/

2.3.3. Korosi Erosi

Korosi yang terjadi akibat dari adanya keausan pada struktur logam dan juga akibat dari logam melewati aliran fluida korosif yang deras atau aliran fluida korosif yang deras melewati logam yang diam. Kedua hal tersebut dapat mengikis pelindung pada logam dan mengakibatkan permukaan logam menjadi kasar. Dampak dari hal ini dapat dikurangi dengan cara menggunakan material logam yang lebih kuat, tidak melewati aliran fluida yang deras, menggunakan inhibitor, dan meng-coating logam dari zat kimia yang agresif (Irwanto et al., 2013).



Gambar 2.7 Stuktur Korosi Erosi
Sumber: corrosion-doctors.org/



Gambar 2.8 Korosi Erosi
Sumber: docplayer.info/

2.3.4. Korosi Galvanis

Korosi galvanis disebabkan oleh 2 struktur logam yang heterogen dan berada dalam larutan elektrolit bersifat korosif yang sejenis. Hal ini menyebabkan logam yang bersifat anoda menjadi kehilangan elektron dan terkorosi, sedangkan logam yang bersifat katoda tidak akan terkorosi (Irwanto et al., 2013).



Gambar 2.9 Struktur Korosi Galvanis
Sumber: Hilti Corrosion Handbook



Gambar 2.10 Korosi Galvanis
Sumber: Hilti Corrosion Handbook

2.3.5. Korosi Tegangan

Ketika sebuah logam diperlakukan secara khusus untuk menguji kekuatan dari logam, seperti ditekuk atau diregang,

daerah tekanan atau regangan tersebut berpotensi untuk tempat terjadinya korosi (Utomo, 2012).



Gambar 2.11 Struktur Korosi Tegangan
Sumber: Hilti Corrosion Handbook



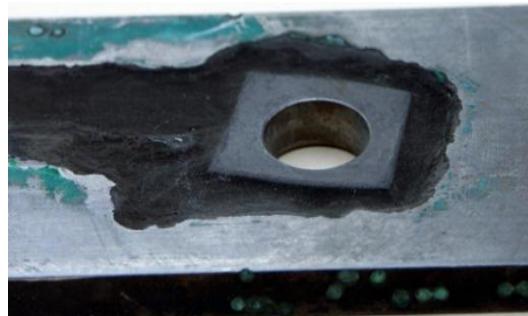
Gambar 2.12 Korosi Tegangan
Sumber: Hilti Corrosion Handbook

2.3.6. Korosi Celah

Korosi Celah terjadi akibat adanya larutan elektrolit korosif yang terjebak dalam suatu celah atau lipatan atau lubang. Hal tersebut juga berakibat pada perbedaan konsentrasi media elektrolit korosif. Dengan adanya perbedaan konsentrasi, maka wilayah yang konsentrasi oksigennya lebih banyak berperan sebagai katoda dan wilayah dengan konsentrasi oksigen rendah berperan sebagai anoda (Irwanto et al., 2013).



Gambar 2.13 Struktur Korosi Celah
Sumber: Hilti Corrosion Handbook



Gambar 2.14 Korosi Celah
Sumber: corrosion-doctors.org/

2.3.7. Korosi Mikrobiologi

Terjadi akibat adanya aktivitas mikroorganisme yang dapat mempengaruhi korosi. Mikroorganisme yang dapat mempengaruhi hal ini antara lain: jamur, alga, bakteri, dan *protozoa*. Untuk mencegah hal ini dapat menggunakan beberapa cara, diantaranya: memilih komposisi logam yang tepat dengan lingkungan operasionalnya, meng*coating* sesuai dengan kebutuhan, memakai perlindungan dengan anoda korban atau arus tanding, dll (Utomo, 2012).

2.3.8. Korosi Antar Butir

Korosi antar butir adalah korosi yang terjadi pada antar butir logam yang disebabkan oleh adanya pengotoran pada batas butir logam tersebut. Contoh pengotoran dapat berupa *khromium* di batas butir, yang menyebabkan batas butir menjadi rentan terhadap serangan korosi (Irwanto et al., 2013).



Gambar 2.15 Struktur Korosi Antar Butir
Sumber: Hilti Corrosion Handbook



Gambar 2.16 Korosi Antar Butir
Sumber: theconstructor.org/

2.4. Metode Pencegahan Korosi

Bagi perusahaan-perusahaan yang bergerak dalam produksi minyak dan gas bumi, pipa menjadi aset yang sangat berharga, karena apabila terjadi kerusakan maka perusahaan akan merugi. Oleh karena itu pipa harus dilindungi dari korosi untuk mencegah dan mengurangi dampak yang ditimbulkan akibat korosi. Terdapat berbagai metode yang dapat diaplikasikan pada pipa sesuai dengan kebutuhannya, diantaranya:

2.4.1. Modifikasi Rancangan

Menjadi tahapan awal untuk mencegah korosi, karena dengan mengubah rancangan atau desain utama dari sebuah struktur logam dapat menjadi salah satu untuk mencegah korosi. Modifikasi rancangan struktur logam utamanya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang berubah-ubah, terlebih jika struktur logam dioperasikan tidak menetap pada lokasi yang sama.

Selain itu, yang perlu diperhatikan dari metode ini adalah ketika terdapat celah yang dapat dimasuki oleh zat-zat kimia bersifat korosif. Masalah ini dapat atasi dengan memodifikasi rancangan yang menggunakan penyekat sebagai solusinya.

Terperangkapnya kotoran-kotoran juga menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi modifikasi rangcangan. Korosi dari tertimbunnya kotoran tidak dapat dilihat langsung karena tertutupi oleh adanya kerak dari timbunan kotoran.

2.4.2. Modifikasi Lingkungan

Beberapa hal dalam modifikasi lingkungan yang dapat dilakukan untuk mencegah atau mengurangi terjadinya korosi adalah:

- Menurunkan Kelembaban Relatif
Umumnya, logam dengan yang terbuat dari baja,besi, nikel, dan tembaga dapat mengalami korosi apabila kelembaban relatif di lungkungan sekitarnya lebih dari 60%.
- Modifikasi terhadap Larutan Elektrolit
Hal ini dilakukan ketika logam beroperasi dengan larutan elektrolit. Berikut adalah tahapan memodifikasi larutan elektrolit:
 - Konduktivitas ionik yang diturunkan
 - Derajat Keasaman yang diubah
 - Oksigen yang dikurangi secara homogen
 - Temperatur yang diubah

2.4.3. Pemberian Lapisan Pelindung

Korosi juga dapat dicegah menggunakan metode Lapisan Penghalang. Lapisan penghalang biasa disebut juga dengan “cat”. Secara teori, cat dibuat dari 3 komposisi dasar yang terdiri dari perpaduan antara Wahana, Pigmen, dan Aditif yang dapat membuat sebuah proteksi.

Cat mempunyai beberapa jenis sesuai dengan bahan kimia pengikatnya. Beberapa contohnya adalah:

- Cat Primer Pra-Fabrikasi
Bertujuan untuk melindungi logam dari korosi selama proses fabrikasi yang berjalan selama beberapa bulan. Ketika proses fabrikasi telah berakhir dan memasuki proses pelapisan terakhir, sisa-sisa cat primer tidak perlu dibersihkan seluruhnya. Jika terdapat kerusakan dibeberapa bagian, maka wajib dilakukan pengecatan ulang secara lokal sesuai dengan prosedur yang dimiliki pabrik.

Komposisi yang digunakan untuk membuat cat primer adalah dari bubuk seng atau besi oksida merah yang dicampur dengan resin epoksid yang berfungsi sebagai pengikat. Cat primer membutuhkan waktu sekitar 2 sampai 3 menit setelah dioleskan pada permukaan logam.

- Cat Primer Pra-Perlakuan
Dilakukan untuk mendapatkan hasil akhir pengecatan yang berkualitas baik. Langkah-langkah yang

harus dilakukan dalam melakukan pengecatan pra-perlakuan adalah: melakukan pembersihan pada permukaan logam dari kotoran-kotoran dan pengecatan tidak boleh dilakukan di atas lapisan kerak.

- Cat Minyak

Komposisi utama cat minyak adalah dari minyak pengering nabati, contohnya seperti minyak rami (*linseed oil*) dan minyak kayu (*tung oil*). Proses oksidasi yang berlangsung lama menjadi indikasi terjadinya pengeringan. Pengecatan lapisan baru dilakukan setelah 48 jam pengecatan dengan minyak dan butuh menunggu 7 hari sebelum pemberian cat akhir.

- Vernis

Untuk membuat sebuah wahana, dibutuhkan minyak pengering dan resin alami atau sintetik. Fungsi dari resin untuk memperbaiki sifat-sifat pengering, pengikat lapisan, dan untuk menyempurnakan cat minyak. Setiap tipe resin dalam cat mempunyai fungsi masing-masing. Contohnya Cat dengan tipe resin fenolat mempunyai fungsi untuk menahan terjadinya abrasi, dengan catatan proses pengecatan tidak boleh dilakukan pada permukaan yang lembab.

- Alkid

Menjadi jenis pelapis yang paling umum dan sangat bervariasi. Komposisinya terdiri dari etilena glikol, minyak rami, dan anhidrida ftalat. Cat yang termasuk dalam golongan *long oil* dapat mengering dengan proses polimerisasi oksidatif yang kandungan minyaknya cenderung lebih banyak 65%. Sedangkan cat *short length* dikeringkan dengan proses pemanggangan dan mempunyai kandungan minyak yang tidak setinggi cat *long oil*.

- Resin Epoksid

Cat yang mengering dengan reaksi polimerisasi yang terjadi antara resin epoksid dengan agen pengering dan termasuk kelompok cat yang jenisnya bervariasi. Resin epoksid terbagi menjadi 2 berdasarkan proses pengeringannya, yaitu: Proses pengeringan dengan peniupan (*air-drying*) dan pengeringan dengan pemanggangan (*stoving*), dimana masing-masing pengeringan menggunakan jenis agen pengering yang berbeda.

Agen pengering yang digunakan pada pengeringan *air-drying* adalah senyawa amina yang dicampur tepat

sebelum cat digunakan, sedangkan senyawa fenolat digunakan pada agen pengering dengan pemanggangan yang dicampurkan di tempat yang sama dengan resin.

- **Poliuretan**

Cat dengan karakteristik tidak bisa diaplikasikan pada permukaan logam yang kelembabannya terlalu tinggi dan basah. Adhesi yang baik dihasilkan dari cat pra-perlakuan yang sudah diaplikasikan terlebih dahulu hingga kering sebelum poliuretan diaplikasikan.

- **Vinil**

Dalam penggunaannya, kopolimer dilarutkan ke dalam sebuah pelarut dan proses pengeringan akan terjadi melalui penguapan dari pelarut tersebut. Proses pengeringan terjadi sebentar saja selama 2 sampai 5 menit. Karakteristik dari vinil adalah tahan terhadap udara, minyak, dan lemak. Oleh karena itu menyebabkan vinil sangat efektif untuk diaplikasikan pada struktur baja yang terendam air. Cat yang mengandung polivinil butiral, seng kromat, dan asam fosfat sangat tepat dijadikan sebagai cat primer.

- **Karet Diklorinasi**

Pembuatannya dilakukan dengan melarutkan karet terklorinasi ke dalam pelarut-pelarut khusus (aromatik). Karena karakteristik dari karet yang sangat rapuh, untuk memperkuatnya, perlu ditambahkan bahan yang bersifat mulur.

Kelebihan dari karet diklorinasi adalah terbentuknya lapisan yang ketahanannya kuat jika diaplikasikan pada udara yang terbuka dan kerusakannya mudah untuk diperbaiki. Kelemahannya dapat menjadi lunak kembali apabila berinteraksi dengan minyak atau lemak.

- **Seng Anorganik**

Terbentuk dari campuran bubuk seng dengan senyawa silikat kompleks dan menggunakan sistem pelarut yang dapat mengering sendiri sebagai pengikatnya. Hasil dari menggunakan seng anorganik sebagai pelapis adalah terciptanya lapisan yang kuat, tahan terhadap kikisan, melekat erat pada permukaan logam, dan tidak terpengaruh oleh cuaca sehari-hari. Mudahnya melakukan pelapisan ulang.

Proteksi yang dihasilkan dapat melindungi baja dengan daya tahan 10 hingga 40 tahun. Perlindungan yang

diberikan dapat bertahan lebih lama jika ditambahkan cat seperti: epoksid, vinil, karet diklorinasi, atau poliuretan.

2.4.4. Pemilihan Bahan

Dalam menentukan bahan jenis apa yang akan digunakan, harus tau karakteristik dari masing-masing bahan tersebut dan harus tau kondisi lingkungan seperti apa yang akan menjadi tempat beroperasinya bahan tersebut. Sehingga diharapkan bahan yang dipilih dapat bertahan lama dari serangan korosi.

2.4.5 Proteksi Katodik

Metode yang umum digunakan dan menjadi metode yang efektif dalam melindungi logam dari korosi. Prinsip dari metode proteksi katodik adalah anoda (+) menjadi tempat terjadinya korosi dan katoda (-) menjadi tempat yang bebas dari korosi.

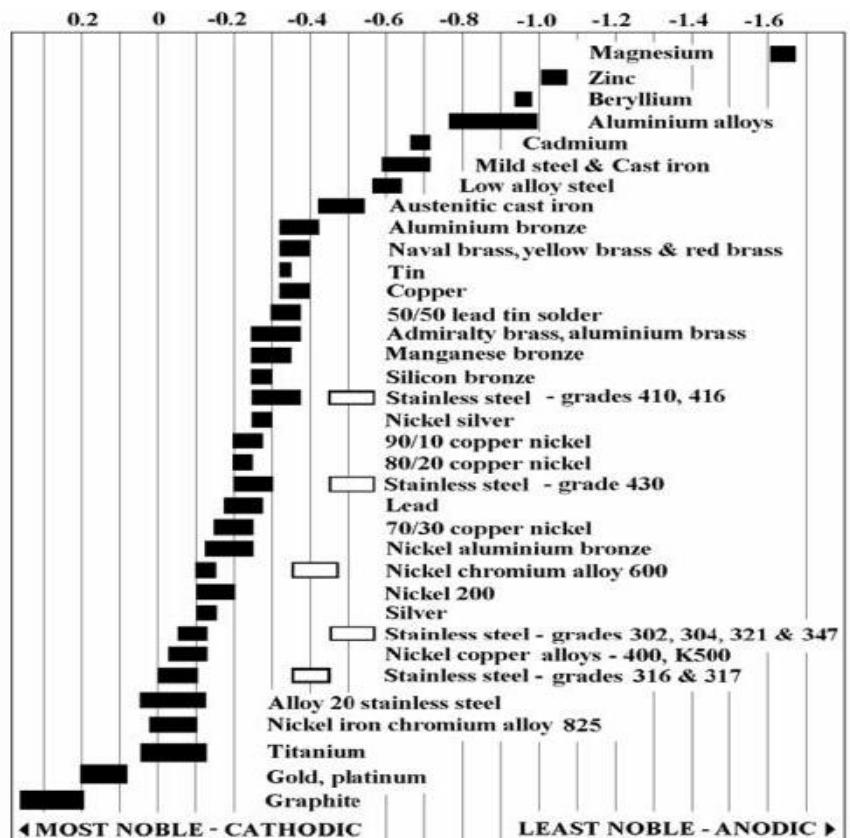
Umumnya logam berperan sebagai anoda, tetapi karena metode ini bertujuan untuk melindungi logam maka logam berperan sebagai katoda. Selain itu, dibutuhkan juga aliran elektron yang mempunyai arus lebih tinggi daripada elektron yang dihasilkan dari reaksi redoks.

Berdasarkan NACE RP0169, standar potensial proteksi yang disarankan dalam potensial proteksi untuk baja dalam tanah adalah sebesar ≤ -850 mV atau $-0,85$ V vs Cu/CuSO₄.

Metode Katodik dibagi menjadi 2 berdasarkan sumber listriknya, yaitu metode anoda korban (*Sacrificial Anode*) dan metode arus yang dipaksakan (*Impressed Current*) dengan masing-masing penjelasan di bawah ini:

- Metode Anoda Korban (*Sacrificial Anode*)

Metode ini memanfaatkan interaksi logam dengan anoda korban untuk dapat menghasilkan energi listrik. Metode ini mengusung konsep deret galvanik. Deret galvanik merupakan urutan potensial dari masing-masing jenis logam, dimana masing-masing jenisnya mempunyai nilai termodynamik.

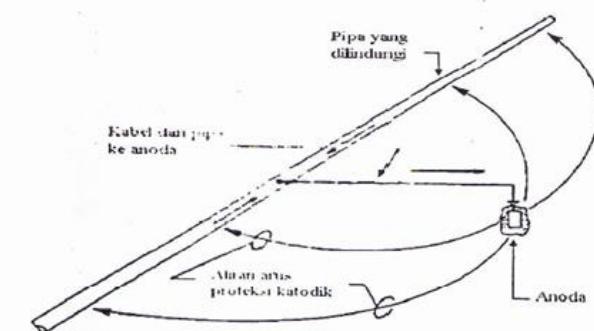


Gambar 2.17 Deret Galvanik

Sumber: google.com

Dari deret galvanik, dapat diketahui jika logam yang dilindungi adalah besi *stainless steel*, maka anoda korban yang dapat digunakan terdiri dari *silicon bronze* hingga magnesium.

Prinsip kerjanya adalah dengan mengumpamkan anoda korban yang lebih gampang teroksidasi dari logam yang dilindungi, sehingga terjadi perpindahan elektron dari anoda korban menuju logam yang dilindungi melalui perantara larutan elektrolit yang korosif dan konduktor.



Gambar 2.18 Mekanisme Anoda Korban
Sumber: google.com

Keuntungan yang didapat dari metode anoda korban adalah:

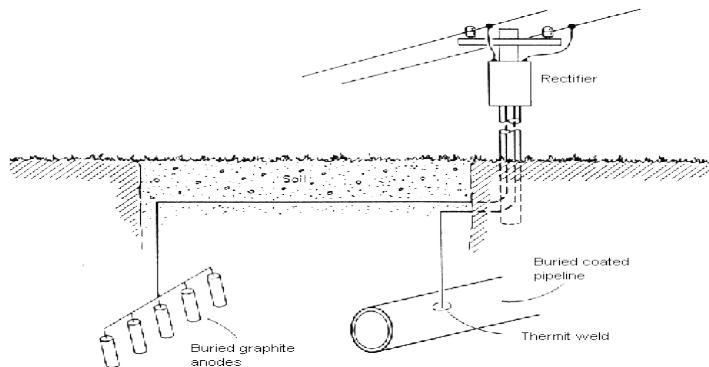
- + Tidak membutuhkan energi listrik eksternal
- + Proses pemasangan yang mudah
- + Biaya operasi yang relatif murah
- + Rendahnya bahaya *over-protect*
- + Tidak membutuhkan pemeliharaan

Kekurangan dari metode anoda korban adalah:

- + Terbatasnya arus yang dihasilkan
- + Kurang efektif untuk sistem konstruksi yang besar
- + Arus yang dihasilkan tidak dapat dikontrol
- + Membutuhkan banyak anoda korban untuk skala besar.

▪ **Metode Arus tanding (*Impressed Current*)**

Metode ini dapat beroperasi jika mendapat sumber arus eksternal. Prinsip dari metode arus yang dipaksakan ini adalah melindungi logam dengan cara mengalirkan arus listrik searah yang diperoleh dari sumber eksternal. Sumber listrik biasanya dari penyiar arus (*transformer rectifier*), dimana kutub negatif dihubungkan ke logam yang dilindungi dan kutub positif dihubungkan ke anoda.



Gambar 2.19 Mekanisme Arus Tanding
Sumber: google.com

Berdasarkan gambar deret galvanik, jenis anoda yang biasanya digunakan pada metode ini adalah: *nickel iron, titanium, gold, platinum, dan graphite*.

Keuntungan yang didapat dari metode arus tanding adalah:

- ⊕ Output arus keluaran yang dihasilkan besar
- ⊕ Dapat mengatur arus keluaran
- ⊕ Daya tahan sistem yang panjang
- ⊕ Biaya perawatan yang relatif rendah
- ⊕ Efektif untuk melindungi konstruksi yang besar

Kekurangan dari metode anoda korban adalah:

- ⊕ Membutuhkan pemeliharaan yang rutin
- ⊕ Kemungkinan terjadi *over-protect* yang tinggi
- ⊕ Biaya pemasangan yang relatif tinggi
- ⊕ Pemasangan yang rumit
- ⊕ Bergantung pada sumber energi listrik eksternal

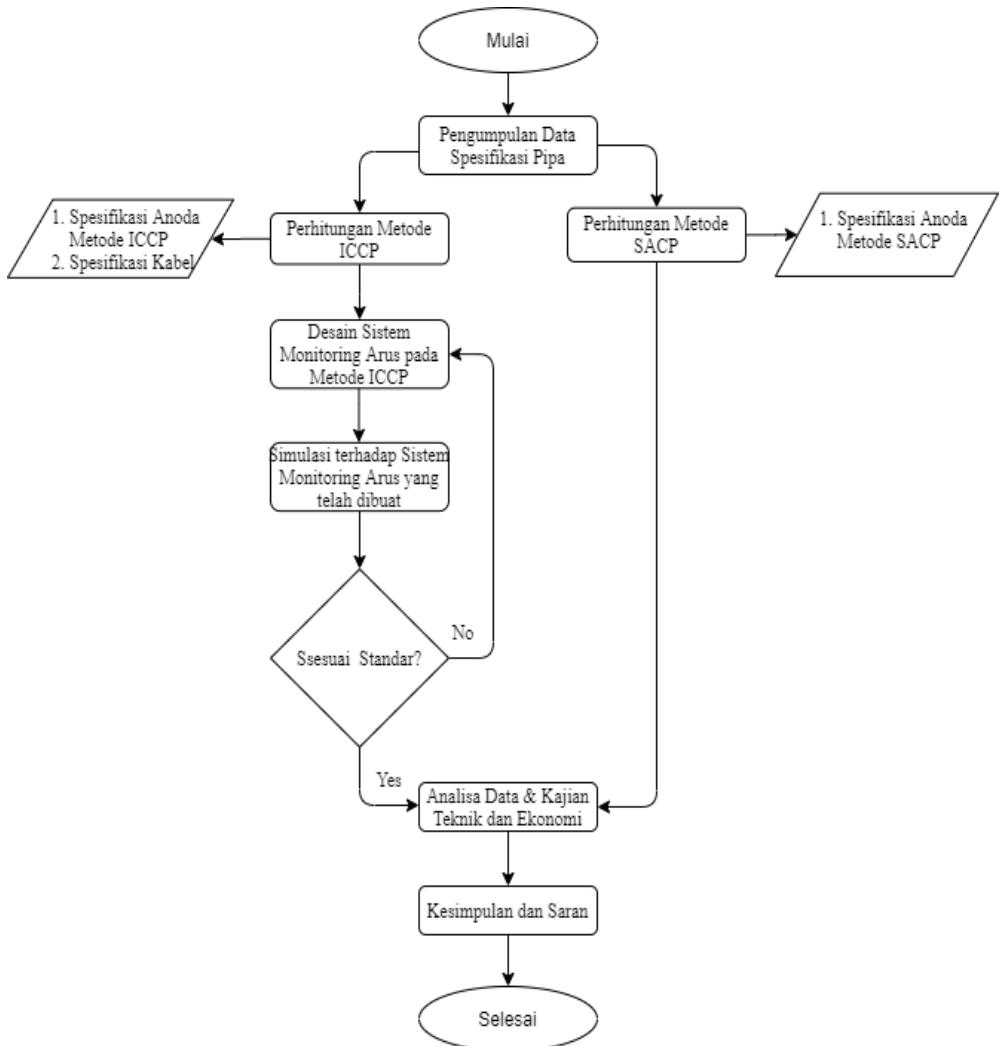
“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alur Penelitian

Diagram alur dibuat untuk mempermudah pengerjaan tugas akhir dengan arahan yang sudah terstruktur. Berikut ini merupakan diagram alur yang digunakan dalam penelitian ini:



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

3.2. Pengumpulan Data

Pada saat melakukan penelitian, peneliti tentunya harus mempunyai data pendukung yang sudah tervalidasi. Data tersebut dapat berfungsi sebagai acuan dan perbandingan hasil perhitungan, simulasi,

bahkan eksperimen. Berikut data-data spesifikasi pipa yang dibutuhkan dalam melakukan penelitian ini adalah:

- Panjang pipa
Menunjukkan seberapa panjang pipa yang akan dilindungi
 - Diameter luar pipa
Menunjukkan seberapa luas permukaan pipa yang akan dilindungi
 - Kerapatan arus
Menunjukkan seberapa besar kerapatan arus yang dimiliki oleh pipa, baik yang terlapisi dengan *coating* maupun tidak.
 - Tipe pengecatan
Menunjukkan metode yang digunakan untuk melindungi pipa dengan metode pengecatan.
 - Masa penggunaan
Menunjukkan seberapa lama umur penggunaan pipa.

3.3. Perhitungan Metode ICCP

Dalam proses perhitungan, juga dibutuhkan pengumpulan data spesifikasi anoda dan kabel yang akan digunakan. Data spesifikasi anoda dan kabel dipilih berdasarkan kebutuhan sistem.

Perhitungan tersebut dimulai dari perhitungan kebutuhan arus hingga jumlah kebutuhan anoda-katoda yang dibutuhkan. Adapun formula yang digunakan untuk mendesain sistem ICCP, diantaranya adalah:

- #### ▪ Perhitungan Luas Proteksi Pipa (A_p)

Keterangan:

- A_p = Luas permukaan pipa yang diproteksi (m^2)
 - π = Phi
 - OD = Diameter Luar Pipa (m)
 - L = Panjang Pipa (m)

- #### ■ Perhitungan Arus Proteksi (I_p)

Keterangan:

-  **Ip** = Arus proteksi pipa (A)
 -  **AP** = Luas permukaan pipa yang diproteksi (m^2)
 -  **CD** = *Current Density of Pipe* (mA/m^2)
 -  **CB** = *Coating Breakdown*

- #### ■ Perhitungan Kebutuhan Anoda (N)

Keterangan:

-  N = Jumlah Minimum Anoda yang Dibutuhkan
 I_p = Arus Proteksi pipa (A)
 μ = Faktor Utilitas
 = 0,8
 I_A = Arus Keluaran Anoda (A)

- Perhitungan Jarak Pemasangan Antar Anoda (S)

Keterangan:

-  L = Panjang Pipa (m)
 -  n = Jumlah Anoda yang Dibutuhkan
 -  S = Jarak Antar Anoda (m)

■ Perhitungan Tahanan Anoda (R_a)

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L_a} \left\{ l_n \left(\frac{8L_a}{d_a} \right) - 1 \right\} \dots \dots \dots \quad (3.5)$$

Keterangan:

-  R_a = Tahanan Anoda (ohm)
 -  L_a = Panjang Anoda (cm)
 -  d_a = Diameter Anoda (cm)
 -  ρ = Resistivitas Lingkungan (ohm.cm)

■ Perhitungan Tahanan Kabel

Keterangan:

- | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|
|  R _c | = Tahanan Kabel | (ohm) |
|  ρ _c | = Resistansi Konduktor | (ohm.m) |
|  L _c | = Panjang Kabel | (m) |
|  a _c | = Luas Penampang Kabel | (m ²) |

■ Perhitungan Tahanan Total

Keterangan:

-  R_a = Tahanan Anoda (ohm)
 R_c = Tahanan Kabel (ohm)

 R_t = Tahanan Total (ohm)

- Perhitungan Tegangan *Output Rectifier*

Keterangan:

$$I_p = \text{Arus Proteksi pipa} \quad (\text{A})$$

$$R_t = \text{Tahanan Total} \quad (\text{ohm})$$

$$V_t = \text{Tegangan Output Rectifier} \quad (V)$$

Sebagai tambahan untuk *safety factor*, nilai V_t dikalikan 15% dengan formula sebagai berikut:

- Perhitungan Arus *Input Rectifier*

Keterangan:

 E_{dc} = Tegangan Output DC (V)

$$+ \quad I_{dc} \quad = \quad \text{Arus Output DC} \quad (\text{A})$$

$$E_{ac} = \text{Tegangan Input AC} \quad (V)$$

 η = Efisiensi Transformer ke *Rectifier*

$$+ \quad I_{ac} = \text{Arus Input AC} \quad (\text{A})$$

■ Perhitungan Daya *Rectifier*

Keterangan:

$$E_{ac} = \text{Tegangan Input DC} \quad (V)$$

$$I_{ac} = \text{Arus Input DC} \quad (\text{A})$$

 P = Daya Rectifier (W)

3.4. Desain Monitoring Arus ICCP

Perancangan dapat dilakukan setelah komponen algoritma dan data berupa dimensi pipa, kerapatan arus, dan *factor coating breakdown* telah *diinput* dalam *software*, sehingga dapat dilakukan proses perancangan oleh *Software*. *Software* yang digunakan adalah Matlab dan sudah diakui oleh tempat peneliti melakukan pendidikan.

3.5. Simulasi Desain Monitoring Arus ICCP

Setelah tahap pembuatan desain monitoring arus, dilakukan simulasi pada desain tersebut untuk mengetahui apakah desain sistem monitoring arus ICCP sudah bisa dioperasikan sesuai dengan standar yang berlaku atau tidak. Apabila sudah bisa dioperasikan sesuai dengan standar, maka lanjut ke tahap berikutnya. Namun, jika tidak maka harus mengulang proses perancangan desain sistem monitoring arus ICCP.

3.6. Perhitungan Metode SACP

Sebelum memulai perhitungan, dibutuhkan data spesifikasi anoda yang akan digunakan. Data spesifikasi anoda dipilih berdasarkan kebutuhan sistem.

Perhitungan ini dilakukan dengan tujuan untuk melihat seberapa banyak kebutuhan anoda yang digunakan selama 20 tahun. Adapun formula yang digunakan untuk dalam perhitungan ini, diantaranya adalah:

- Perhitungan Total Kebutuhan Berat Anoda (W_0)

Keterangan:

-  I_p = Arus Proteksi Pipa (A)
 -  Y = Umur Desain Pipa (year)
 -  K = *Anode Capacity* (A.Hr/kg)
 -  U = *Utility Factor*
 -  = 0,8
 -  W_o = Total Kebutuhan Berat Anoda (kg)

- #### ▪ Perhitungan Kebutuhan Jumlah Anoda (N)

Keterangan:

- W_o = Total Kebutuhan Berat Anoda (kg)
 - W_a = Berat Anoda per-satuan (kg)
 - N = Kebutuhan Jumlah Anoda

- #### ▪ Perhitungan Total Berat Anoda yang Dipasang (W_i)

$$W_i \equiv N x W_a \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (3.14)$$

Keterangan:

- N ≡ Kebutuhan Jumlah Anoda

-  W_a = Berat Anoda per-satuan (kg)
 W_i = Total Berat Anoda yang Dipasang (kg)

- Perhitungan *Lifetime* Anoda yang Dipasang (T_i)

Keterangan:

- W_i = Total Berat Anoda yang Dipasanga (kg)
 - K = *Anode Capacity* (A.Hr/kg)
 - U = *Utility Factor*
 - = 0,8
 - I_p = Arus proteksi pipa (A)

3.7 Analisa Data & Kajian Teknik dan Ekonomi

Untuk menentukan kesimpulan dari penelitian ini, dilakukan analisa data & kajian dari sisi teknik dan ekonomi. Mengkaji dari sisi teknik dan ekonomi dilakukan dengan tujuan akhir menentukan dan memilih metode apa yang pantas diterapkan untuk melindungi *pipeline* gas milik PT Pelindo Energi Logistik, Benoa dari korosi.

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Umum

Sebelum melakukan perhitungan sistem perlindungan *Impressed Current Cathodic Protection*, dibutuhkan informasi data dari kondisi *pipeline*. Setelah semua data diperoleh, dilakukan perancangan desain sistem monitoring *Impressed Current Cathodic Protection*. Selanjutnya dilakukan pembahasan dampak dari perubahan proteksi dari *Sacrificial Anode Cathodic Protection* menjadi *Impressed Current Cathodic Protection*.

4.1.1 Data Pipeline

Berikut ini adalah beberapa data dari kondisi umum *pipeline* milik PT Pelindo Energi Logistik, Benoa:

- Diameter Luar Pipa (OD)
Besar dimeter luar pipa: 16 inch atau 6,502 meter
- Kerapatan Arus (CD)
Besarnya kerapatan arus: 20 mA/m²
- Tipe Pengecatan
Jenis pengecatan yang digunakan: 3LPE
- Masa Penggunaan
Pipa ini didesain penggunaannya selama 20 tahun
- Resistivitas Tanah
Besarnya resistivitas tanah: 2468 ohm.cm

4.1.2 Data Anoda

Berikut merupakan spesifikasi anoda yang dipilih untuk metode ICCP adalah:

- Jenis Material : *Titanium*
- Diameter Anoda (OD_a) : 19 mm
- Panjang Anoda (L_a) : 1200 mm
- *Current Output* : 7,2 A
- *Design Life* : 20 year

4.1.3 Data Kabel

Dari kebutuhan, maka spesifikasi kabel yang dipilih adalah sebagai berikut:

- *No. AWG* : 8
- *Nominal Diameter* : 0,370 inch
- *DC Resistance* : 0,652 ohm/km

- *Weight* : 87 lbs/mft

4.2 Perhitungan Metode *Impressed Current Cathodic Protection*

Tahap selanjutnya adalah melakukan perhitungan mulai dari kebutuhan arus proteksi, jumlah anoda, hingga tegangan yang menggunakan data utama dari *pipeline*. Berikut adalah tahapan perhitungan:

- a. Perhitungan Luas Proteksi Pipa (A_p)

Contoh perhitungan luas proteksi pipa pada km point 00+300

$$A_p = 3,14 \times 0,406 \times 300$$

$$A_p = 382,829 \text{ m}^2$$

Tabel 4.1 Perhitungan Luas Proteksi Pipa

No	KM Point	D		L		π	A
	(km)	(inch)	(m)	(km)	(m)		(m ²)
1	00+300	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
2	00+600	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
3	00+900	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
4	01+200	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
5	01+500	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
6	01+800	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
7	02+100	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
8	02+400	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
9	02+700	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
10	03+000	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
11	03+300	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
12	03+600	16	0,406	0,300	300	3,14	382,829
13	03+658	16	0,406	0,058	58	3,14	74,014

- b. Perhitungan Arus Proteksi (I_p)

Contoh perhitungan arus proteksi pada km point 00+300

$$I_p = 382,829 \times 0,02 \times 5\%$$

$$I_p = 0,382829 A$$

Tabel 4.2 Perhitungan Arus Proteksi Pipa

No	KM Point	A	C _d		I _p
	(km)	(m ²)	(mA/m ²)	(A/m ²)	(A)
1	00+300	382,829	20	0,02	0,382829
2	00+600	382,829	20	0,02	0,382829
3	00+900	382,829	20	0,02	0,382829
4	01+200	382,829	20	0,02	0,382829
5	01+500	382,829	20	0,02	0,382829
6	01+800	382,829	20	0,02	0,382829
7	02+100	382,829	20	0,02	0,382829
8	02+400	382,829	20	0,02	0,382829
9	02+700	382,829	20	0,02	0,382829
10	03+000	382,829	20	0,02	0,382829
11	03+300	382,829	20	0,02	0,382829
12	03+600	382,829	20	0,02	0,382829
13	03+658	74,014	20	0,02	0,074014

- c. Perhitungan Kebutuhan Anoda (N)

Contoh perhitungan kebutuhan anoda pada km point 00+300

$$N = \frac{0,382829}{0,8x7,2}$$

$$N = 0.066$$

N = 1

Tabel 4.3 Perhitungan Kebutuhan Anoda

No	KM Point	I_p	μ	I_A	N
	(km)	(A)		(A)	
1	00+300	0,382829	0,8	7	1
2	00+600	0,382829	0,8	7	1
3	00+900	0,382829	0,8	7	1
4	01+200	0,382829	0,8	7	1
5	01+500	0,382829	0,8	7	1
6	01+800	0,382829	0,8	7	1
7	02+100	0,382829	0,8	7	1
8	02+400	0,382829	0,8	7	1
9	02+700	0,382829	0,8	7	1
10	03+000	0,382829	0,8	7	1
11	03+300	0,382829	0,8	7	1
12	03+600	0,382829	0,8	7	1
13	03+658	0,074	0,8	7	1

d. Perhitungan Jarak Pemasangan Antar Anoda (S)

Contoh perhitungan jarak pemasangan antar anoda pada km point 00+300

Tabel 4.4 Perhitungan Jarak Pemasangan Antar Anoda

No	KM Point	L		N	S
	(km)	(km)	(m)		(m)
1	00+300	0,300	300	1	300
2	00+600	0,300	300	1	300
3	00+900	0,300	300	1	300
4	01+200	0,300	300	1	300
5	01+500	0,300	300	1	300
6	01+800	0,300	300	1	300
7	02+100	0,300	300	1	300
8	02+400	0,300	300	1	300
9	02+700	0,300	300	1	300
10	03+000	0,300	300	1	300
11	03+300	0,300	300	1	300
12	03+600	0,300	300	1	300
13	03+658	0,058	58	1	58

e. Perhitungan Tahanan Anoda (R_a)

Contoh perhitungan tahanan anoda pada km point 00+300

$$R_a = \frac{\rho}{2 \pi L_a} \left\{ l_n \left(\frac{8 L_a}{d_a} \right) - 1 \right\} \dots \dots \dots \quad (4.5)$$

$$R_a = \frac{2468}{2 \times 3,14 \times 120} \left\{ l_n \left(\frac{8 \times 120}{1,9} \right) - 1 \right\}$$

$$R_a = \frac{2468}{753,6} \{ l_n (505,3) - 1 \}$$

$$R_a = 3,275 \times 5,225$$

$$R_a = 17,11 \text{ ohm}$$

f. Perhitungan Tahanan Kabel (R_c)

Kabel yang digunakan untuk menghubungkan anoda dengan sumber listrik dibagi menjadi 4 bagian sepanjang 3670 m. Hal

ini akan mempengaruhi jumlah rectifier, dilakukan untuk menjaga kontinuitas sistem agar tetap bisa memproteksi pipa.

Contoh perhitungan tahanan kabel

$$R_c = 0,652 \times 10^{-3} x \left(\frac{930}{0,007384} \right)$$

$$R_c = 0,652 \times 10^{-3} \times 12594$$

$$R_c = 82,118 \text{ ohm}$$

g. Perhitungan Tahanan Total (R_t)

Contoh perhitungan tahanan kabel

$$R_t = 17,11 + 82,118$$

$$R_t = 99,23 \text{ ohm}$$

h. Perhitungan Tegangan Ouput Rectifier (V_t)

Contoh perhitungan tegangan *output rectifier*

$$V_t = 0,382829 \times 99,23$$

$$V_t = 37,99 \text{ volt}$$

Untuk *safety*, nilai V_t dikali dengan 15%

$$V_t' = 37,99 x (1 + 15\%)$$

$$V_t' = 43,69 \text{ volt}$$

i. Perhitungan Arus Input *Rectifier* (V_t)

Contoh perhitungan arus input *rectifier*

$$I_{ac} = \frac{43,69 \times 0,382829}{220 \times 20\% \times \sqrt{3}}$$

$$I_{ac} = 0,2195 \text{ ampere}$$

- #### j. Perhitungan Daya *Rectifier* (E)

Contoh perhitungan daya *rectifier*

$$P = \sqrt{3} x 0,2195 x 220$$

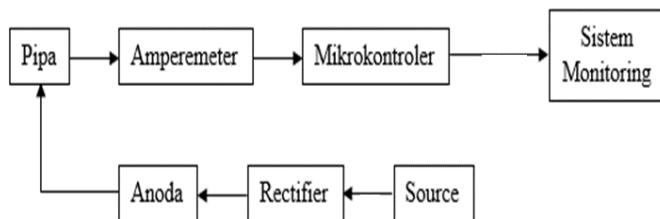
$$P = 83,62 \text{ watt}$$

4.3 Desain Sistem Monitoring *Impressed Current Cathodic Protection*

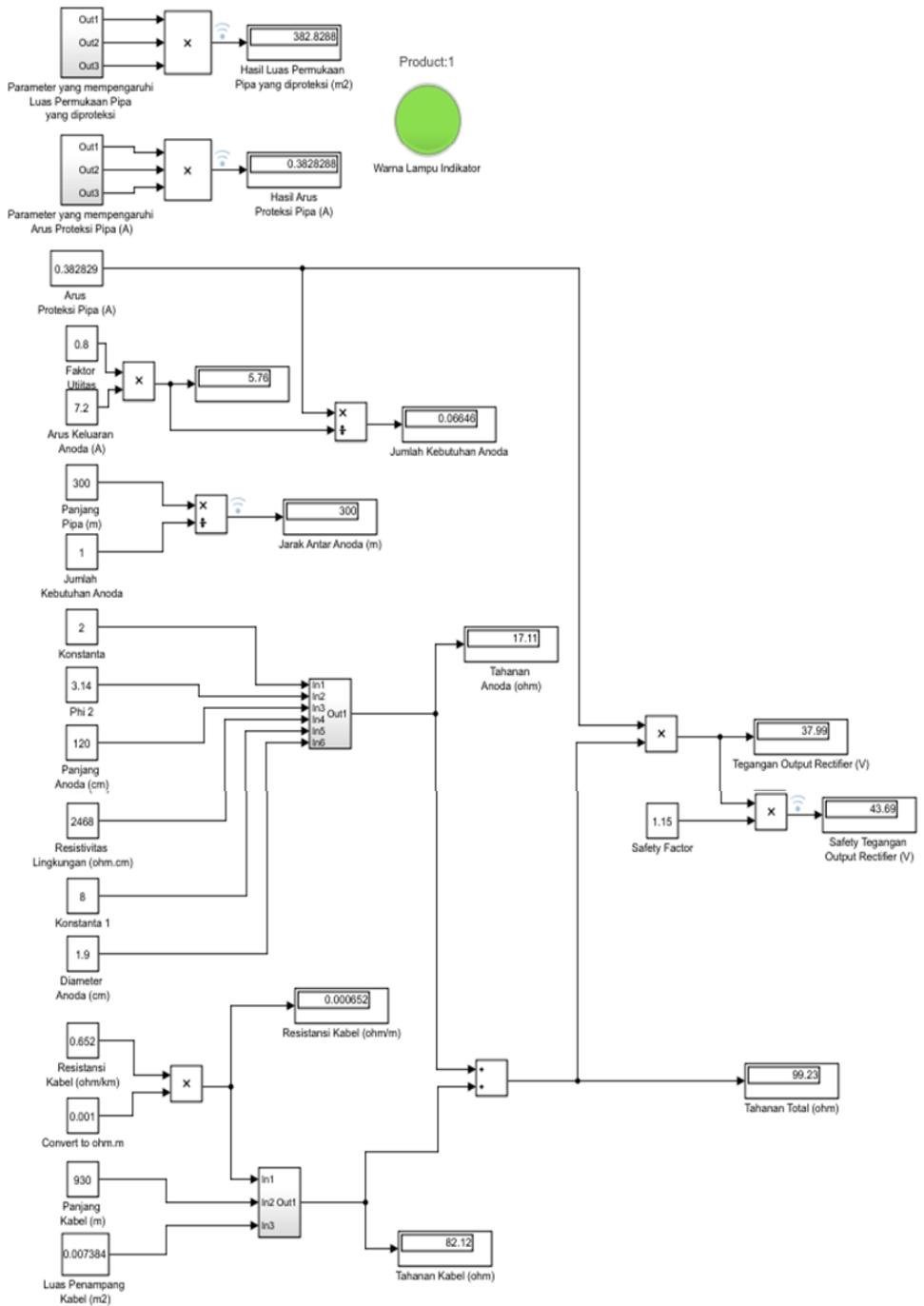
Perancangan desain sistem monitoring *Impressed Current Cathodic Protection* dilakukan dengan menggunakan bantuan *Software MATLAB R2017b*. Sistem monitoring ini bertujuan untuk mempermudah kegiatan perawatan dengan mengetahui berapa besarnya arus yang dapat melindungi pipa dari korosi melalui indikator berupa warna lampu.

Sebelum mendesain sistem *monitoring*, terlebih dahulu perlu mengetahui cara kerja sistem monitoring dalam bentuk diagram blok. Pada gambar 4.1 di bawah ini, terlihat bahwa metode *Impressed Current* membutuhkan sumber listrik dari luar sistem yang berbentuk arus DC. Sehingga membutuhkan *rectifier* untuk mengubah arus AC menjadi DC. Arus yang berasal dari *rectifier* dialirkan menuju anoda. Anoda inilah yang akan memproteksi pipa.

Dalam memonitoring arus proteksi pada pipa, pipa akan tersambung dengan *amperemeter*, *amperemeter* akan menghasilkan luaran berupa arus yang memproteksi pipa. Hasil dari pengukuran arus proteksi akan diteruskan menuju mikrokontroler. Mikrokontroler akan memberikan data kepada sistem monitoring.



Gambar 4.1 Diagram Blok Sistem Monitoring Arus *Impressed Current*



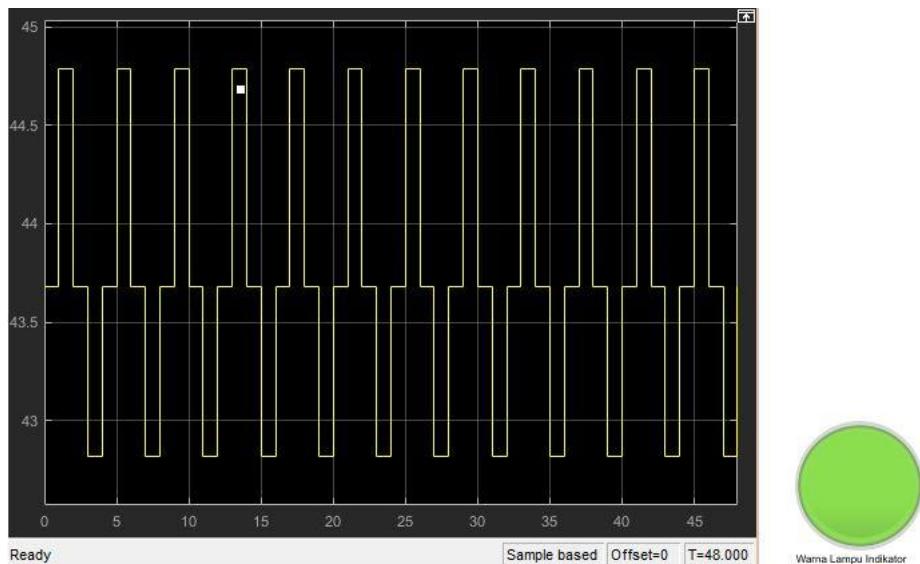
Gambar 4.2 Diagram Sistem Monitoring pada *Matlab*

Pada gambar 4.2, terlihat bentuk dari sistem monitoring arus *Impressed Current* yang telah dibuat pada *matlab*. Diagram ini dibuat menggunakan beberapa fungsi yang ada di *matlab*, diantaranya:

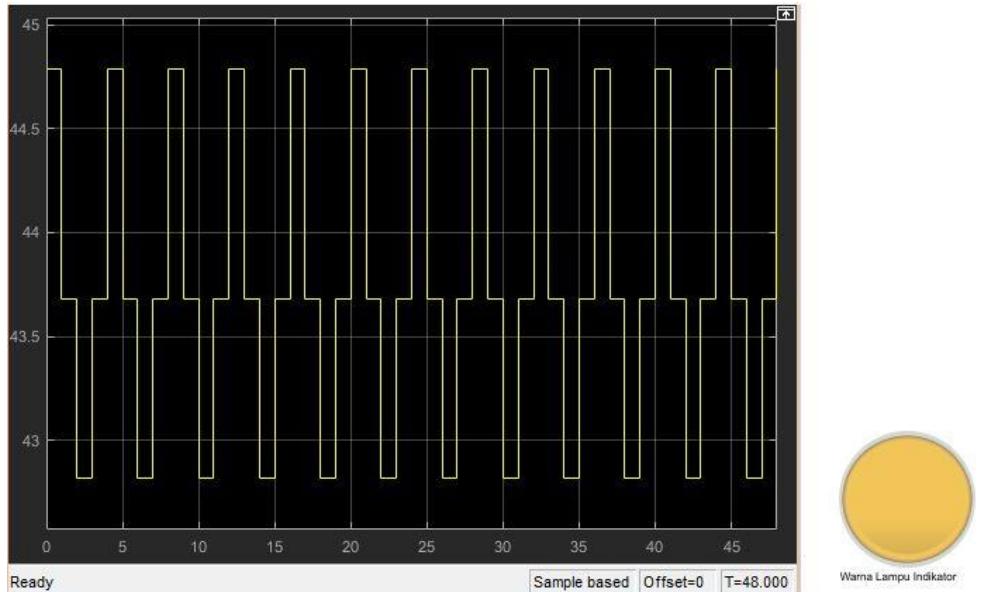
- *Product* : operasi untuk perkalian
- *Divide* : operasi untuk perkalian dan pembagian
- *Math Function* : operasi untuk *log*, *exp*, dll.
- *Add* : operasi untuk pertambahan
- *Subtract* : operasi untuk pertambahan dan pengurangan

Fungsi-fungsi tersebut akan diinput sebagai data pada mikrokontroler yang digunakan pada sistem monitoring ini. Data seperti panjang dan diameter pipa, kerapatan arus pada pipa, dan *factor coating breakdown* akan menjadi input untuk menghasilkan nilai arus proteksi pada pipa dan juga sebagai input untuk mikrokontroler. Dilanjutkan dengan mengatur nilai arus pada setiap warna lampu. Hal ini bertujuan untuk mengetahui apakah anoda tersebut sudah mengalirkan arus proteksi sesuai standar atau tidak.

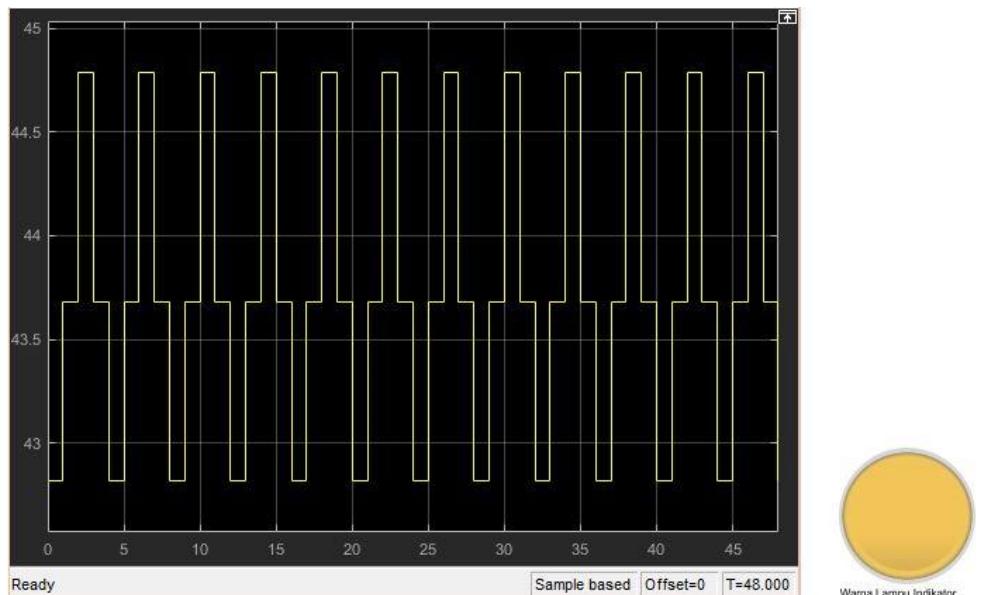
Terdapat juga grafik tegangan yang mengalir pada *rectifier*. Dalam penelitian ini, grafik tegangan dibuat dengan menginput data arus. Data arus yang diinput sebesar: 0,3828 A; 0,3925 A; 0,3828 A; 0,3752 A. Sehingga didapatkan grafik tegangan sebagai berikut:



Gambar 4.3 Grafik Tegangan dengan *input* arus 0,3828 A



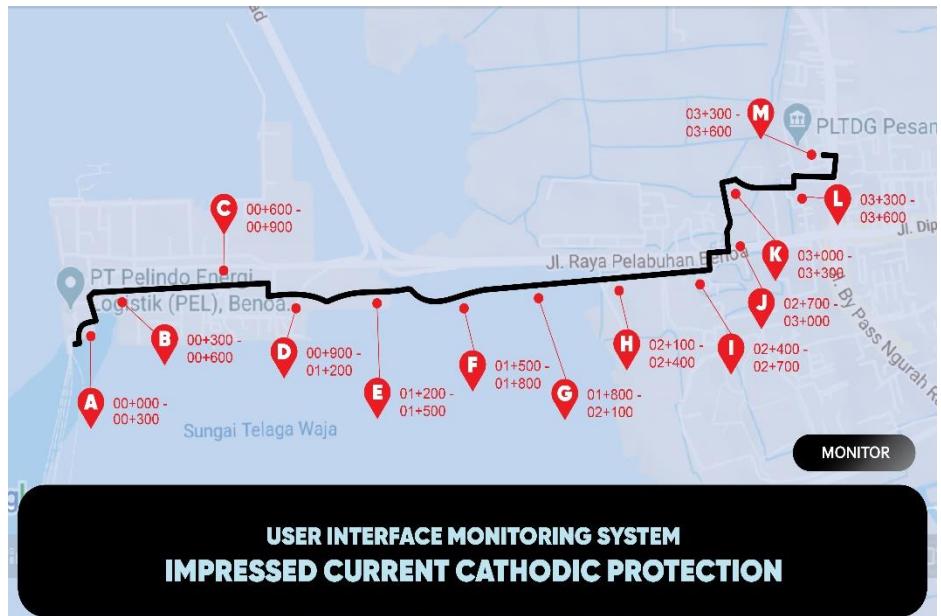
Gambar 4.4 Grafik Tegangan dengan *input* arus 0,3925 A



Gambar 4.5 Grafik Tegangan dengan *input* arus 0,3752 A

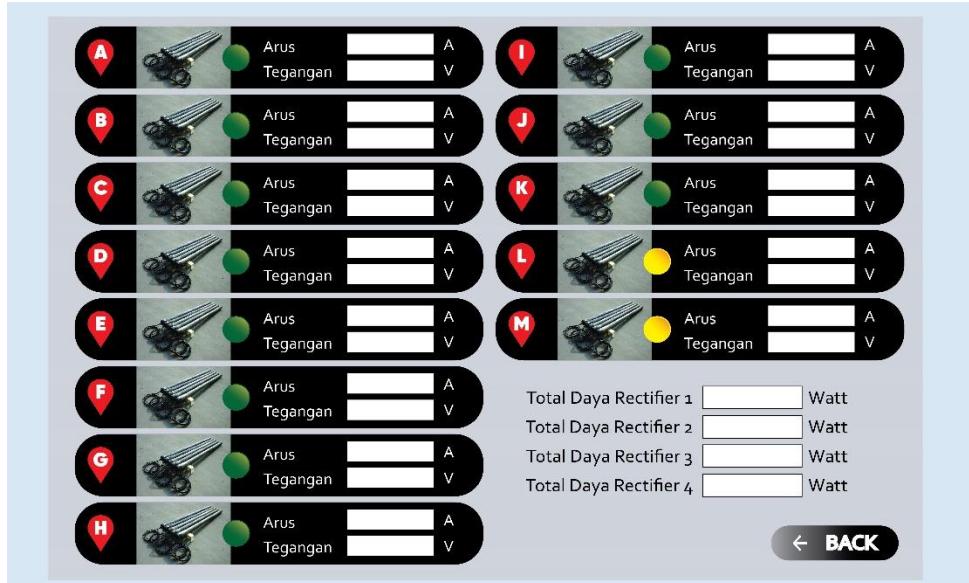
Dapat dilihat pada gambar 4.3 bahwa input arus senilai 0,3828 A menghasilkan tegangan sebesar 43,68 V. Dan terdapat warna lampu indikator berwarna hijau yang menandakan bahwa arus yang memproteksi pipa sudah sesuai standar.

Pada gambar 4.4 terlihat bahwa input arus senilai 0,3925 A menghasilkan tegangan sebesar 44,79 V. Dan terdapat warna lampu indikator berwarna kuning yang menandakan bahwa arus yang memproteksi pipa tidak sesuai dengan standar. Begitu pula yang terjadi pada gambar 4.5, dengan input arus sebesar 0,3752 A menghasilkan tegangan sebesar 42,82 V, sehingga warna lampu indikator berwarna kuning.



Gambar 4.6 Screen 1, User Interface Sistem Monitoring Arus Impressed Current

Tampilan *user interface* untuk sistem monitoring arus *impressed current* dapat dilihat pada gambar 4.3 di atas. *Screen 1* dari *user interface* menunjukkan pipa sepanjang 3,67 km, dimulai dari lokasi PT. Pelindo Energi Logistik, Benoa sampai dengan PLTG Pesanggaran. Disepanjang pipa dilengkapi dengan lokasi penempatan anoda. Lokasi penempatan anoda disimbolkan menggunakan abjad dari A hingga M. Setiap titik antar anoda memiliki jarak 300 meter.



Gambar 4.7 Screen 2, User Interface Sistem Monitoring Arus Impressed Current

Pada gambar 4.4 di atas terdapat tampilan *screen 2* dari *user interface* sistem monitoring arus *impressed current*. *Screen 2* akan muncul ketika menunjuk salah satu lokasi penempatan anoda. Selain itu, *screen 2* juga menunjukkan detail data dari setiap anoda. Terdapat tampilan data berupa nilai arus dan tegangan. *Screen 2* juga menunjukkan warna lampu sebagai indikator. Terlihat warna hijau dan kuning, dimana warna hijau menunjukkan bahwa arus proteksi yang mengalir pada pipa sudah sesuai dengan standar, bernilai 0,382829 *ampere*. Sedangkan warna kuning menunjukkan bahwa arus proteksi yang mengalir pada pipa tidak sesuai dengan standar, bernilai kurang dari atau lebih dari 0,382829 *ampere*. Data berupa total daya dari setiap *rectifier* juga dapat terlihat.

4.4 Perhitungan Metode *Sacrificial Anode Cathodic Protection*

Mengacu dari data *pipeline* yang sama, nilai luas permukaan proteksi pipa dan arus proteksi pipa juga bernilai sama dengan metode *Impressed current*. Perhitungan kali ini hanya membahas yang berkaitan dengan berapa banyak jumlah *anoda* yang dibutuhkan.

Adapun data tambahan yang dibutuhkan berupa:

- Berat Anoda (W_a) : 6,8 kg
- Capacity of Magnesium (K) : 1100 A.hr/kg
- Design Life of Pipe (Y) : 20 years

Berikut merupakan *detail* perhitungan metode *Sacrificial Anode Cathodic Protection*:

- a. Perhitungan Total Kebutuhan Berat Anoda (W_o)

Contoh perhitungan total kebutuhan berat anoda pada km point 00+300:

$$W_o = \frac{0,382829 \times 20 \times 8760}{1100 \times 0,8}$$

$$W_o = 76,2 \text{ kg}$$

- b. Perhitungan Kebutuhan Jumlah Anoda (N)

Contoh perhitungan kebutuhan jumlah anoda pada km point 00+300: w

$$N = \frac{76,2}{6,8}$$

$$N = 11,2$$

= 11

Untuk kebutuhan anoda sepanjang 3,67 km, maka dibutuhkan anoda sebanyak 134 buah.

- c. Perhitungan Total Berat Anoda yang diPasang (W_i)

Contoh perhitungan total berat anoda yang dipasang sepanjang 3,67 km:

$W_i = 132 \times 6,8$

$$W_i = 911,2 \text{ kg}$$

- d. Perhitungan *Lifetime* Anoda yang diPasang (T_i)

Contoh perhitungan *lifetime* anoda dipasang sepanjang 3,67 km:

$$T_i = \frac{911,2 \times 1100 \times 0,8}{8760 \times 0,382829}$$

$T_i = 11.9 \text{ year}$

$$T_i = 11 \text{ year}$$

Jadi, kebutuhan perlindungan katodik untuk pipa yang didesain selama 20 tahun, dibutuhkan 2 kali pergantian anoda.

4.5 Kajian Penggunaan Impressed Current Cathodic Protection

Perubahan metode *Sacrificial Anode* menjadi *Impressed Current* tentunya menimbulkan dampak bagi perusahaan. Dampak tersebut dapat di analisis dari segi ekonomi maupun segi teknik. Berikut ini adalah analisis dampak dari pergantian metode *Sacrificial Anode* menjadi *Impressed Current*:

4.5.1 Segi Ekonomi

Untuk mengetahui dampak perubahan metode *Sacrificial Anode* menjadi *Impressed Current* dari segi ekonomi, dilakukan perhitungan total biaya yang dibutuhkan. Total biaya berasal dari biaya pengadaan, instalasi, dan operasional dari masing-masing metode.

a. Metode *Impressed Current Cathodic Protection*

Sebagai pengingat, bahwa anoda untuk *impressed current* tidak akan termakan oleh usia. Jadi, umur pemakaian anoda akan sesuai dengan umur desain penggunaan pipa, yaitu selama 20 tahun.

- Biaya Pengadaan

Biaya pengadaan dihitung dari *material* yang digunakan, diantaranya: anoda, *power cable*, *junction box*, dan *rectifier* yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan. Di bawah ini adalah total perhitungan biaya pengadaan metode *impressed current cathodic protection*:

Tabel 4.5 Biaya Pengadaan Metode *Impressed Current Cathodic Protection*

Biaya Pengadaan <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>				
No	Material	Harga Satuan	Jumlah	Total
1	<i>MMO Titanium Tubular Anode Outer Diameter (19 mm)</i> <i>Length (1200 mm)</i> <i>Current Output (7,2 A)</i> <i>Life Design (20 year)</i>	Rp 291.600	13	Rp 3.790.800
2	<i>Cathodic Protection Cable HMWPE ASTM B3-8 600 V</i> <i>Outer Diameter (0,370 in)</i> <i>No. AWG (8)</i> <i>DC Resistance (0,652 ohm/km)</i>	Rp 23.728	3720	Rp 88.268.160
3	<i>Transformer Rectifier AC Input (220-440 V)</i> <i>DC Output Current (0 - 50 A)</i> <i>DC Output Voltage (0 - 50 V)</i>	Rp 22.357.890	4	Rp 89.431.560
4	<i>Junction Box</i>	Rp 14.304.480	4	Rp 57.217.920
			Total	Rp 238.708.440

- Biaya Instalasi

Dibutuhkan juga perhitungan biaya instalasi untuk pemasangan material dengan menyewa jasa orang dan alat. Di bawah ini adalah total

perhitungan biaya instalasi metode *impressed current cathodic protection*:

Tabel 4.6 Biaya Instalasi Metode *Impressed Current Cathodic Protection*

Biaya Instalasi <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>				
No.	Jenis Kegiatan	Harga Satuan	Jumlah	Total
1	Pemasangan <i>Transformer Rectifier</i>	Rp 17.532.000	4	Rp 70.128.000
2	Pemasangan <i>Junction Box</i>	Rp 17.532.000	4	Rp 70.128.000
3	Pemasangan Anoda	Rp 847.380	13	Rp 11.015.940
			Total	Rp 151.271.940

- Biaya Operasional

Metode *impressed current* membutuhkan energi listrik eksternal dari PLN, maka tetap ada biaya operasional sebagai biaya untuk mengoperasikan sekaligus biaya perawatan untuk memastikan semua alat dapat berfungsi sesuai dengan standar. Di bawah ini adalah total biaya operasional metode *impressed current cathodic protection*:

Tabel 4.7 Biaya Operasional Metode *Impressed Current Cathodic Protection*

Biaya Operasional <i>Impressed Current Cathodic Protection</i>				
No.	Jenis Kegiatan	Harga Satuan	Jumlah	Total
1	Inspeksi Tahunan	Rp 5.844.000	20	Rp 116.880.000
2	Biaya Listrik	Rp 997	57801,6	Rp 57.613.167
			Total	Rp 174.493.167

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dari jenis kegiatan untuk biaya operasional adalah:

- ✚ Inspeksi tahunan, dilakukan dengan memeriksa kondisi pipa, *rectifier*, dan *junction box* oleh 2 orang *inspector* selama 1 hari. Upah 2 orang *inspector* Rp 905.820, dibutuhkan biaya transportasi sebesar Rp 569.790, ditambah dengan biaya penggalian sebanyak 13 titik penggalian sebesar Rp

4.368.390. Jadi, total biaya inspeksi tahunan sebesar Rp 5.844.000



Biaya listrik, estimasi bahwa PLTG Pesanggaran termasuk industri besar. Hal tersebut menjadikan PLTG Pesanggaran termasuk golongan I-4/TT, sehingga biaya per kWh sebesar Rp 996,74. Kebutuhan daya *rectifier* sebesar 83,62 watt, ketika dikonversikan menjadi kWh dalam sehari $((83,62/1000) \times 24)$ menjadi 2.007 kWh untuk 1 *rectifier*. Namun kebutuhan listrik harus tetap menyala 24 jam tanpa henti selama 20 tahun untuk 4 buah *rectifier*. Jadi, kebutuhan listrik selama 20 tahun menjadi $(2.007 \times 30 \times 12 \times 20 \times 4)$ 57801,6 kWh. Sehingga total biaya listrik selama 20 tahun sebesar $(57801,6 \times \text{Rp } 997)$ Rp 57.613.167.

b. Metode *Sacrificial Anode Cathodic Protection*

Anoda untuk metode *sacrificial anode* berbeda dengan metode *impressed current*, dimana anoda akan termakan oleh usia. Sehingga, wajib dilakukan pembaruan. Pembaruan anoda dilakukan setiap 11 tahun sekali sesuai dengan perhitungan masa pakai anoda. Jadi, untuk melindungi pipa yang didesain selama 20 tahun, dibutuhkan pembaruan anoda sebanyak 2 kali.

▪ Biaya Pengadaan

Biaya pengadaan dihitung dari *material* yang digunakan, diantaranya: anoda, kabel, dan *test station box* yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan. Di bawah ini adalah total perhitungan biaya pengadaan metode *sacrificial anode cathodic protection*:

Tabel 4.8 Biaya Pengadaan Metode Sacrificial Anode Cathodic Protection

Biaya Pengadaan <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i>				
No.	Material	Harga Satuan	Jumlah	Total

1	<i>High Potential Magnesium Alloy Sacrificial Anode ASTM B843-M1C Closed Voltage (1,58 - 1,62 V) Actual Capacity (1100 A.hr/kg) Weight (6,8 kg)</i>	Rp 337.825	268	Rp 90.537.100
2	<i>Test Station Box</i>	Rp 1.430.448	5	Rp 7.152.240
3	<i>Cathodic Protection Cable HMWPE ASTM B3-8 600 V Outer Diameter (0,370 in) No. AWG (8) DC Resistance (0,652 ohm/km)</i>	Rp 23.728	123	Rp 2.918.544
			Total	Rp 100.607.884

- Biaya Instalasi

Dibutuhkan juga perhitungan biaya instalasi untuk pemasangan material dengan menyewa jasa orang dan alat. Di bawah ini adalah total perhitungan biaya instalasi metode *sacrificial anode cathodic protection*:

Tabel 4.9 Biaya Instalasi Metode *Sacrificial Anode Cathodic Protection*

Biaya Instalasi <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i>				
No.	Jenis Kegiatan	Harga Satuan	Jumlah	Total
1	Pemasangan <i>Test Station Box</i>	Rp 2.191.500	5	Rp 10.957.500
2	Pemasangan Anoda	Rp 657.450	268	Rp 176.196.600
			Total	Rp 187.154.100

- Biaya Operasional

Metode *sacrificial anode* tidak membutuhkan energi listrik eksternal dari PLN, sehingga hanya membutuhkan biaya perawatan

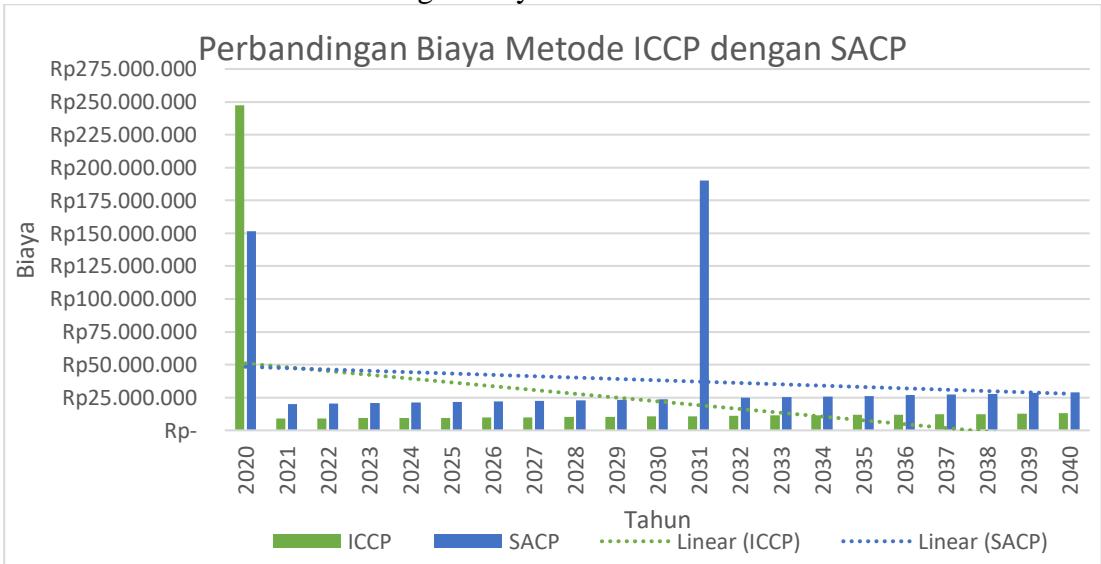
untuk memastikan semua alat dapat berfungsi sesuai dengan standar. Di bawah ini adalah total biaya operasional metode *sacrificial anode cathodic protection*:

Tabel 4.10 Biaya Operasional Metode *Sacrificial Anode Cathodic Protection*

Biaya Operasional <i>Sacrificial Anode Cathodic Protection</i>				
No.	Jenis Kegiatan	Harga Satuan	Jumlah	Total
1	Inspeksi Tahunan	Rp 19.895.540	20	Rp 397.910.800
			Total	Rp 397.910.800

Inspeksi tahunan dilakukan untuk memastikan kondisi pipa dan *test station box* masih dapat beroperasi sesuai dengan standar yang ada. Dibutuhkan 2 orang *inspector* selama 2 hari dengan upah sebesar Rp 1.811.640, upah untuk biaya transportasi sebesar Rp 650.790, dan juga biaya penggalian di 134 titik anoda yang tersebar disepanjang pipa sebesar Rp 17.433.110. Sehingga total biaya inspeksi tahunan sebesar (Rp 1.811.640 + Rp 650.790 + Rp 17.433.110) Rp 19.895.540

c. Perbandingan Biaya antar Metode



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Biaya antar Metode

Pada gambar 4.5 terdapat grafik perbandingan biaya antar metode selama 20 tahun. Dapat dilihat bahwa sumbu x menunjukkan tahun mulai dari 2020 hingga 2040. Sedangkan sumbu y menunjukkan biaya total.

Pada grafik menunjukkan bahwa pada tahun 2020, metode ICCP membutuhkan biaya yang sangat besar daripada metode SACP (Rp 247.433.098). Tetapi pada tahun-tahun selanjutnya hingga 2040 metode ICCP tidak mengeluarkan biaya yang besar seperti pada tahun 2020. Hal tersebut dikarenakan metode ICCP membutuhkan biaya yang besar pada tahap pengadaan dan biaya yang kecil pada tahap operasionalnya.

Sedangkan metode SACP dapat dilihat bahwa pada tahap pengadaan tidak membutuhkan biaya sebesar metode ICCP. Akan tetapi, pada tahap operasionalnya membutuhkan biaya yang lebih banyak dari metode ICCP.

Sehingga dari gambar 4.5 dapat disimpulkan bahwa biaya pengeluaran selama 20 tahun akan lebih ekonomis apabila mengaplikasikan metode ICCP.

4.5.2 Segi Teknik

Pada segi teknik membahas mengenai perbandingan material, instalasi, operasional, dan perawatan dari masing-masing metode:

a. Material yang dibutuhkan

Berdasarkan kebutuhan material dari masing-masing metode, dapat dilihat bahwa metode *impressed current* lebih banyak membutuhkan material, diantaranya: *rectifier*, *junction box*, kabel, dan anoda. Sedangkan untuk metode *sacrificial anode* hanya membutuhkan anoda, kabel dan *test station box*.

b. Anoda

Dilihat dari kebutuhan anoda pada masing-masing metode, metode *impressed current* hanya membutuhkan anoda sebanyak 13. Sedangkan metode *sacrificial anode* membutuhkan anoda sebanyak 268 selama 20 tahun pengoperasian pipa.

c. Operasional

Pada tahap operasional, metode *impressed current* membutuhkan energi listrik dari luar sistem sehingga

dapat mempengaruhi kinerja sistem dan juga menambah biaya operasional. Sedangkan metode *sacrificial anode* tidak membutuhkan energi listrik dari luar untuk melakukan operasional sehingga tidak ada tambahan biaya operasional.

d. Perawatan

Adanya energi listrik dari luar sistem membuat metode *impressed current* dapat dikontrol dan dimonitoring secara *realtime*. Sedangkan metode *sacrificial anode* menggunakan kemampuan dari anoda itu sendiri sehingga tidak bisa mengkontrol, memonitoring dan melakukan tindakan apabila sewaktu-waktu terjadi kegagalan sistem.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diambil setelah melalui tahapan-tahapan dalam mendesain sistem monitoring arus *impressed current cathodic* adalah sebagai berikut:

1. Desain sistem monitoring dibuat menggunakan warna lampu sebagai indikator untuk mengetahui arus proteksi yang mengalir pada pipa sudah sesuai standar atau tidak. Warna lampu hijau menunjukkan bahwa arus proteksi yang mengalir pada pipa sudah sesuai standar ($0,382829$ ampere), sedangkan warna lampu kuning menunjukkan bahwa arus yang mengalir tidak sesuai dengan standar.
2. Berdasarkan kajian dari segi teknik, dapat diketahui bahwa metode *impressed current* dinilai lebih efisien untuk memproteksi struktur yang luas dan perawatannya yang lebih sederhana. Sedangkan dari kajian segi ekonomi, dari perhitungan total masing-masing metode selama 20 tahun diketahui bahwa biaya total metode *impressed current* lebih ekonomis daripada biaya total metode *sacrificial anode* sebesar Rp 337.051.724. Sehingga untuk mendistribusikan gas melalui media *pipeline* dari PT Pelindo Energi Logistik, Benoa hingga PLTD Pesanggaran lebih disarankan menggunakan metode *impressed current*.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melalui tahapan-tahapan dalam mendesain sistem monitoring arus *impressed current cathodic* untuk penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Membuat *user interface* secara *real time* untuk memastikan arus proteksi yang mengalir agar sesuai dengan standar dan juga menghitung dampak dari segi ekonomi menggunakan metode *Net Pressure Value* untuk mengetahui seberapa lama perusahaan dapat balik modal.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, Y. K., Arief, I. S., & Amiadji. (2015). Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja Karbon dengan Variasi Ketebalan Coating. *Jurnal Teknik Its*, 4(1), 1–5.
- Evitts, R. W. (2012). Cathodic Protection. In *Handbook of Environmental Degradation of Materials: Second Edition* (Second Edi, pp. 359–380). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3455-3.00012-2>
- Harahap, M. R. (2016). Sel Elektrokimia: Karakteristik dan Aplikasi. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 2(1), 177–180. <https://doi.org/10.22373/crc.v2i1.764>
- Irawan, A. (2016). *Analisis Korosi pada Pipa Gas*. August.
- Irwanto, D., Basir, Y., & Pamuji, M. (2013). Studi Korosi Pada Pipa Menggunakan Metode Impressed Current Di Petrochina International Jambi. Ltd. *Desiminasi Teknologi*, 1, 198–212.
- Purwatiningsih, A., & Masykur. (2012). Eksplorasi Dan Eksloitasi Pertambanganminyak Dan Gas Bumi Di Laut Natuna Bagian Utara Laut Juridiksi Nasional Untuk Meningkatkan Kesejahteraanmasyarakat Di Kepulauan Natuna. *Jurnal Reformasi*, 2, 59–67.
- Setiawan, J. A. (2016). Mencari Landasan Hukum Pembentukan Badan Penyangga (Aggregator) Gas Alam. *Jurnal Hukum Novelty*, 7(2), 237. <https://doi.org/10.26555/novelty.v7i2.a5470>
- Trethewey, K. R., & Chamberlain, J. (1988). *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasaawan* (M. P. Widodo (ed.)). PT Gramedia Pustaka Utama.
- Utomo, B. (2012). Jenis Korosi Dan Penanggulangannya. *Kapal*, 6(2), 138–141. <https://doi.org/10.12777/kpl.6.2.138-141>
- Wahyuningsih, U., Rusjdi, H., & Sulistiyo, E. (2017). Penanggulangan Korosi Pada Pipa Gas Dengan Metode Catodic Protection (Anoda Korban) Pt Pgn Solution Area Tangerang. *Power Plant*, 5(1), 40–50. <https://doi.org/10.33322/powerplant.v5i1.109>

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

LAMPIRAN A

Spesifikasi dan Harga Material *Impressed Current Cathodic Protection*



MMO Titanium Tubular Anode

FOB Price: US \$20 / Piece

Min. Order: 1 Piece

Payment Terms: L/C, T/T, Western Union

Model NO.	Elade-011	Type	Titanium Pipes
Application	Industrial	Technique	Sintering
Grade	GR1	Shape	Pipe

Parameter

Outer Diameter(mm)	Length(m)	Current Output(A)	Expected Life(Year)
19	1200	7.2	20
25	500	4	20
25	1000	8	20
25	1200	10	20
25	1500	12	20
32	1200	12	20

Spesifikasi dan Harga MMO Titanium Tubular Anode

Rincian cepat

Tempat asal:	Henan, China	Nama merek:	Huadong kabel, Huadong Kabel untuk harga kabel
Nomor model:	600 V HMWPE Cathodic Protection Kabel	Bahan isolasi:	HMWPE
Jenis:	Tegangan Rendah	Aplikasi:	Konstruksi
Bahan konduktor:	Tembaga	Jaket:	Tidak ada
Inti:	1 core	Tegangan:	600 V
Suhu tinggi:	75 °C	Pengiriman:	Dalam waktu singkat
Penyedia:	Pabrik	Standar:	, IEC60502, IEC0228 ASTM B-3
Warna:	Hitam	Ukuran:	Mm2

HDC



600V Hmwpe Cathodic Protection Kabel ASTM B-3/8 Single Core Kelas 2
Terdampar Tembaga Konduktor Berat Molekul Tinggi PE Insulated

FOB Referensi Harga: [Dapatkan Harga Terbaru](#)



Rp 14.907,30 - Rp 89.443,80 / Meter | 500 Meter/meter (Min. Order)

Pengiriman: Dukungan Angkutan laut

💡 [perdagangan Jaminan Lindungi pesanan Alibaba.com Anda](#)

📦 [Alibaba.com Freight](#) | [Learn more](#)

Pembayaran:

Logistik Alibaba.com Solusi Pemeriksaan

sales@hlcables.com

Conductor	Nominals (In.)				Product Wgt.	Nominal DC
AWG	Strand	Cond. O.D.	Insulation	O.D.	(Lbs./Mft)	Resistance
8	7	0.143	0.110	0.370	87	0.652
6	7	0.182	0.110	0.400	122	0.411
4	7	0.229	0.110	0.450	175	0.258
2	7	0.290	0.110	0.510	260	0.162
1	19	0.326	0.125	0.580	330	0.129
1/0	19	0.387	0.125	0.620	400	0.102

Spesifikasi dan Harga *Power Cable*

Quick Details

Place of Origin:	China	Brand Name:	HOWAH
Model Number:	Transformer Rectifier	Keywords:	Transformer Rectifier
Winding Material:	High grade copper	Specification:	according to customer's demand
Customized or not:	yes	Service Condition:	Outdoor&Indoor
Type:	Oil-cooled	Phase:	Three
Coil Structure:	TOROIDAL	Coil Number:	AUTOTRANSFORMER
Usage:	Cathodic protection		



Oil-cooled transformer rectifier for cathodic protection

FOB Reference Price: [Get Latest Price](#)

IDR 22,360,950.00 - IDR 74,536,500.00 / Set | 1 Set/Sets (Min. Order)

Trade Assurance protects your Alibaba.com orders

Alibaba.com Freight | [Learn more](#)

Payments:

Alibaba.com Logistics | [Inspection Solutions](#)

General Specification

TR Specification

A.C. Input	220-440V 10%, Single/Three Phase
Frequency	50HZ/60HZ
D.C. Output Current	0-50Amps
D.C. Output Voltage	0-50Volts
Constant potential control range	0±1.999V
Constant potential control precision	≤±10mV
Constant current control precision	≤±1%
Ripple	≤7%
Input Impedance	≥5 MΩ
Dimension and Weight	1600mm x 800mm x 680mm / 280kgs
Ambient temperature range	-5°C to +55°C
Relative Humidity	Up to 90%

Spesifikasi dan Harga *Transformer Rectifier*

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

LAMPIRAN B

Spesifikasi dan Harga Material Sacrificial Anode Cathodic Protection

Rincian cepat

Tempat asal:	Beijing, China	Nama merek:	BSS
Nomor model:	CMA	Aplikasi:	Cathodic Protection
Nama produk:	Magnesium Anoda	Warna:	Persik
Tipe:	Anoda	Penggunaan:	Banyak
Ukuran:	Terima Kustom	Sertifikat:	ISO9001: 2015
MOQ:	100Kg	Bentuk:	Silinder
Komposisi kimia:	Magnesium Aluminium, Seng, Mangan, Tembaga Silikon, Nik...		

DSS



Potensi Tinggi Kurban Magnesium Anoda

FOB Referensi Harga: [Dapatkan Harga Terbaru](#)

Rp 122.239,86 - Rp 1.528.594,55 / Kilogram | 100 Kilogram/kilogram
(Min. Order)

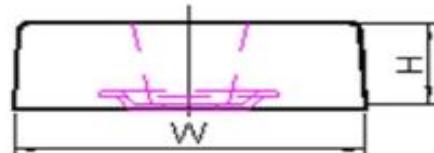
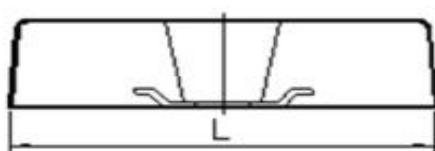
Pengiriman: Dukungan Angkutan laut

Alibaba.com Freight | [Learn more](#)

Pembayaran:

Electrochemical Properties of Cast Magnesium Aqueous Anodes

Item #	Open Voltage (-V)	Closed Voltage (-V)	Actual Capacity (A.h/kg)	Current Efficiency
High Potential ASTM B843-MIC	1.70 -1.75	1.58 -1.62	1100	50%
Standard Potential ASTM B843-AZ63B	1.50 -1.55	1.45 -1.50	1230	55%



Item #	Dimension (mm) WxLxH	Nominal Weight (kg)	
			Bare
BSS-Mg-CAR1	150x75x30	0.5	
BSS-Mg-CAR2	100x100x30	0.5	
BSS-Mg-CAR3	100x100x50	0.8	
BSS-Mg-CAR4	200x100x30	1.0	
BSS-Mg-CAR5	300x150x30	2.4	
BSS-Mg-CAR6	300x200x65	6.5	
BSS-Mg-CAR7	203x203x102	6.8	
BSS-Mg-CAR8	203x203x102	3.4	

Spesifikasi dan Harga *High Potential Magnesium Allo*

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Isa Hanif Maulana. Bertempat lahir di Surabaya pada tanggal 7 Agustus 1998. Penulis menempuh pendidikan taman kanak-kanak di TK Aisyiyah Bustanul Athfal 32 Surabaya. Dilanjutkan menempuh pendidikan sekolah dasar hingga tamat di SD Muhammadiyah 18 Surabaya dan lulus pada tahun 2010. Penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 19 Surabaya dan lulus pada tahun 2013, kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 20 Surabaya dan lulus pada tahun 2016.

Tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dan mengambil bidang *Marine Electrical and Automation System*.

Selama masa pendidikan, penulis aktif dalam organisasi dan kegiatan mahasiswa. Penulis tergabung dalam pengurus Himasikal FTK-ITS pada Departemen Kesejahteraan Mahasiswa. Penulis juga diberi amanah untuk menjadi Kepala Departemen Kesejahteraan Mahasiswa dalam Kepengurusan Himasikal FTK-ITS 2019. Selain itu, penulis juga melakukan Kerja Praktek yang dilaksanakan pada PT PAL Indonesia dan PT POMI.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”