

## OPTIMASI DESAIN DAN SIMULASI SISTEM PROTEKSI KATODIK ANODA KORBAN PADA WATER INJECTION PIPELINE PERTAMINA-PETROCHINA EAST JAVA TUBAN PLANT

Mustika Dwi Erlinda, Budi Agung Kurniawan, dan Mas Irfan P. Hidayat  
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia  
e-mail: mustikaerlinda@gmail.com

**Abstrak**— Saluran *Water Injection Pipeline* yang dianalisis pada penelitian ini memiliki panjang 2605.8 m yang berada di bawah permukaan tanah. Pemilihan sistem proteksi katodik anoda korban disesuaikan dengan kebutuhan arus proteksi pada pipa. Desain awal mengatakan bahwa dibutuhkan 10 buah anoda dengan waktu desain 20 tahun. Namun, di lapangan ditemukan telah terjadi beberapa kali kebocoran pada *Water Injection Pipeline* pada bagian riser tepat di bawah permukaan tanah. Setelah dilakukan rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban didapatkan hasil bahwa untuk area CPA dibutuhkan 4 buah (*17 lb high Magnesium anode*) untuk menyuplai kebutuhan arus sebesar 0.167 A, area sawah membutuhkan 7 buah (*32 lb high magnesium anode*) untuk menyuplai arus proteksi sebesar 0.5989 Ampere dan pad C membutuhkan 2 (*32 lb high magnesium anode*) untuk menyuplai kebutuhan arus sebesar 0.101 Ampere. Hasil rancang ulang yang telah dilakukan disimulasikan menggunakan software ANSYS APDL 15.0 dalam bentuk 2D untuk menilai kelayakan dari desain proteksi katodik. Dari empat variable potensial proteksi yang disimulasikan didapatkan hasil bahwa kriteria arus proteksi minimal dapat tercapai saat potensial proteksi sebesar -882 mV, -950 mV, -1094 mV. Sedangkan pada potensial proteksi -785 mV terdapat area di sekitar pipa yang nilai arus proteksinya kurang dari kriteria yang ditetapkan. Hal ini sesuai dengan standar NACE SP 0169 sehingga desain proteksi katodik yang telah dirancang dapat diterima.

**Kata Kunci**— ANSYS thermal electric analysis, NACE SP 0169, Proteksi Katodik Anoda Korban, Water Injection Pipeline

### I. PENDAHULUAN

Joint Operating Body Pertamina Petrochina East Java (JOB P-PEJ) merupakan salah satu perusahaan kontraktor kontrak kerjasama (KKKS) minyak dan gas bumi (Migas) dalam bidang eksplorasi yang terdapat di daerah Jawa Timur Kecamatan Soko Kabupaten Tuban. Pertamina-Petrochina East Java saat ini terdiri dari 2 lapangan yaitu Mudi (Tuban) dan Sukowati (Bojonegoro). Lapangan Mudi terdiri dari pad A, pad B, dan pad C. Sedangkan lapangan Sukowati terdiri dari Sukowati A dan Sukowati B. Minyak ditransportasikan melalui sistem perpipaan, dari masing-masing sumur (Mudi dan Sukowati) menuju ke *Central Processing Area* (CPA) untuk diolah. Selain digunakan sebagai transportasi minyak dan gas, pipa juga digunakan untuk mengalirkan air sisa dari proses pengolahan minyak. JOB PPEJ menggunakan sistem *Water Injection Pipeline* yang dialirkan dari CPA menuju ke pad C. *Water Injection Pipeline* ini berfungsi sebagai media transportasi *produce water (multiphase fluida)* dari *separator* yang ada di CPA menuju ke sumur-sumur di area pad C.

Korosi adalah hasil interaksi antara material dengan lingkungannya<sup>[1]</sup>. Sistem perlindungan terhadap korosi pada *Water Injection Pipeline* milik JOB Pertamina Petrochina East

*Java Tuban Plant* menggunakan *coating* col tar enamel dengan sistem proteksi katodik anoda korban (SACP). Studi kasus dalam penelitian ini mengambil permasalahan pada JOB Pertamina Petrochina East Java Tuban Plant. Hasil monitoring yang dilakukan oleh JOB Pertamina Petrochina East Java ditemukan pipa *water injection* yang kurang terproteksi dari korosi. Pipa *water injection* membentang sepanjang CPA-sawah- pad C. Hasil monitoring menunjukkan area pad C merupakan daerah yang rawan terjadi korosi.

Sistem proteksi katodik anoda korban yang direncanakan berjalan selama 20 tahun dengan total kebutuhan anoda sebanyak 10 buah tidak bekerja secara maksimal. Sehingga pada studi kasus ini akan dilakukan evaluasi dan rancang ulang terhadap sistem proteksi katodik anoda korban untuk *water injection pipeline* milik Pertamina Petrochina East Java Tuban Plant. Selanjutnya hasil rancang ulang pada area pad C akan disimulasikan kelayakannya menggunakan software ANSYS yang berprinsip pada metode elemen hingga. Standar keberhasilan dari desain rancang ulang mengacu pada NACE SP 0169.

### II. METODE PENELITIAN

#### A. Pengumpulan Data dan Standar Perancangan

Data yang dikumpulkan untuk analisa studi kasus ini meliputi, data struktur pipa, data lapis lindung, data resistivitas tanah, nilai kapasitas anoda dan waktu guna, waktu desain, *safety factor*, dan ukuran sebuah anoda, dimana anoda yang digunakan yaitu *high magnesium anode*<sup>[2]</sup>. Standar perancangan yang digunakan yaitu DNV RP B401 tentang *Cathodic Protection Design* dan NACE SP 0169 tentang *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping System*.

#### B. Perhitungan Rancangan Desain SACP<sup>[3]</sup>

a) Luas permukaan pipa yang dilindungi, dihitung sesuai persamaan berikut:

$$A_c = \pi \times OD \times L \quad (1)$$

Dimana,

$A_c$  = luas struktur pipa, m<sup>2</sup>

OD = diameter luar pipa, m

L = panjang pipa, m

#### b) Kebutuhan Arus Proteksi

Kebutuhan arus untuk proteksi pipa adalah faktor utama yang harus diperhatikan dalam perancangan sistem SACP. Sebelum menghitung kebutuhan arus proteksi terlebih dahulu dilakukan penentuan rapat arus dari logam yang akan diproteksi, dimana untuk baja dengan lapis lindung yang berada dalam tanah memiliki rapat arus 0,5 mA/m<sup>2[3]</sup>. Pada pipa dengan *coating*, faktor *coating breakdown* perlu

dimasukkan pula dalam perhitungan<sup>[4]</sup>. Perhitungan kebutuhan arus dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c \quad (2)$$

Dimana,

$I_c$  = arus total untuk proteksi

$A_c$  = luas struktur pipa, m<sup>2</sup>

$f_c$  = *coating breakdown*

$i_c$  = rapat arus dari logam, mA/m<sup>2</sup>

#### c) Berat total anoda

Berat total anoda yang digunakan untuk menyediakan kebutuhan arus didapat dari persamaan berikut:

$$M = \frac{I_{total} \times t \times 8760}{c \times u} \quad (3)$$

Dimana,

$M$  = berat total anoda, kg

$I_{total}$  = Arus proteksi, A

$T$  = waktu proteksi, tahun

$c$  = kapasitas anoda, A-h/kg

$u$  = faktor utilitas (0.85)

1 tahun = 8760 jam

#### d) Jumlah anoda, dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$n = \frac{M_{total}}{M_{anoda}} \quad (4)$$

Dimana,

$n$  = jumlah anoda, buah

$M_{total}$  = berat total anoda selama waktu desain, kg

$M_{anoda}$  = berat sebuah anoda, kg

#### e) Jarak pemasangan antar anoda, dapat didapat melalui persamaan berikut:

$$S_a = \frac{L}{n} \quad (5)$$

Dimana,

$S_a$  = jarak pemasangan antar anoda, m

$L$  = panjang total pipa, m

$n$  = jumlah anoda

#### f) Kebutuhan arus proteksi tiap jarak anoda

Keperluan arus proteksi tiap jarak anoda berfungsi agar arus yang diberikan anoda bisa merata, dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$I_s = \pi \times OD \times S \times i_c \quad (6)$$

Dimana,

$I_s$  = keperluan arus proteksi berdasarkan jarak pemasangan, A

$OD$  = total diameter pipa, m

$S$  = jarak pemasangan antar anda, m

$i_c$  = rapat arus dari logam, mA/m<sup>2</sup>

#### g) Resistansi Groundbed anoda

Resistansi groundbed anoda menentukan besarnya arus proteksi yang dapat dikeluarkan oleh anoda, pada studi kasus ini anoda dipasang secara horizontal, yang dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$Rh = \left( \frac{\rho}{2 \times \pi \times l} \right) \times \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \quad (7)$$

Dimana,

$Rh$  = Resistansi anoda yang dipasang secara horizontal, ohm

$\rho$  = tahanan jenis tanah, ohm-cm

$l$  = panjang anoda, cm

$d$  = diameter anoda, cm

#### h) Kapasitas keluaran anoda, dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$I_a = \frac{E_a - E_c}{Rh} \quad (8)$$

Dimana,

$I_a$  = kapasitas keluaran arus anoda, A

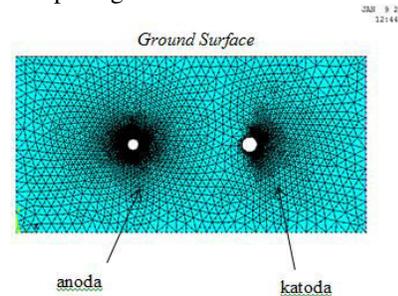
$E_a$  = potensial anoda (volt)

$E_c$  = potensial katoda (volt)

$Rh$  = Resistansi anoda yang dipasang secara horizontal, ohm

#### C. Model Simulasi pada pad C

Simulasi dilakukan dalam bentuk 2D, yang direpresentasikan pada gambar 1. berikut:



**Gambar 1.** Geometri tanah sistem SACP 2D

Gambar 1 menunjukkan area katoda (pipa) dengan diameter 26.9 cm dan area anoda dengan diameter 20.3 cm yang terpisah sejauh 200 cm dari pusat masing-masing anoda dan katoda. Pada suatu sistem SACP jarak antara anoda dan pipa tidak boleh kurang dari 150 cm<sup>[5]</sup>. Kondisi batas di sekitar pipa pada sudut  $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$  disimulasikan pada kondisi tidak *tercoating*, yang merepresentasikan *coating breakdown* sebesar 75%.

#### a. Parameter Keberhasilan Simulasi

Parameter keberhasilan simulasi mengacu pada kebutuhan arus minimal yang harus dipenuhi oleh pipa dalam satu unit sistem SACP 2 dimensi, dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 1.** Arus minimal proteksi pada sistem 2 dimensi

Perhitungan	Notasi	Angka
$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$\phi \cdot OD \cdot L$	0.845
$I$ (A)	$A \cdot I_c \cdot f_c + (5\% \times I)$	$3.3 \cdot 10^{-4}$

#### b. Pemodelan element type

Dalam penelitian ini, tipe elemen yang digunakan adalah PLANE 223 dikarenakan elemen ini memiliki kemampuan untuk digunakan dalam analisis *thermal-electric* dalam bentuk 2 dimensi. Elemen ini mampu menunjukkan distribusi temperatur dan potensial pada suatu sistem 2 dimensi. Elemen ini memiliki 8 node dengan lebih dari empat derajat kebebasan pada tiap nodenya.

### c. Pemodelan Sifat Material

Sifat material yang dimasukkan dalam penelitian ini yaitu sifat dari tanah dengan tipe *alluvial soil* sesuai dengan kondisi tanah yang ada pada pad C. Jenis Material property yang digunakan terdiri dari sifat fisik, sifat termal, dan sifat elektrik meliputi densitas tanah, konduktivitas termal dan resistivitas yang dapat dilihat pada tabel berikut,

**Tabel 2.** Sifat Material Model

Sifat Material	Nilai
Densitas ( $\text{kg/m}^3$ )	1360
Konduktivitas termal ( $\text{W/mK}$ )	0.272
Resistivitas ( $\text{Ohm-m}$ )	11.8

### d. Meshing

Metode meshing yang digunakan yaitu dengan cara *free mesh* sepanjang luasan geometri 2 dimensi. Elemen yang digunakan berbentuk *triangular shape* dengan ukuran menggunakan pengaturan *smart size* sebesar 1.

### e. Pembebanan

Terdapat dua jenis pembebanan yang digunakan yaitu pembebanan thermal dan elektrik. Pembebanan thermal terdiri dari temperatur dan heat flux. Temperatur dibebankan pada daerah permukaan tanah sebesar 303 K, bagian dasar tanah sebesar 283 K dan batas pipa sebesar 355 K. Sedangkan *heat flux* dibebankan pada daerah selain dari yang dibebankan oleh temperatur sebesar 0. Pembebanan temperatur hanya diberikan untuk melengkapi jalannya proses agar simulasi menjadi konvergen tetapi tidak akan dibahas lebih lanjut karena penelitian berfokus pada analisis arus proteksi pada sistem proteksi katodik. Sedangkan pembebanan elektrik yang diberikan terdiri dari nilai potensial (volt) dan arus (A) pada kondisi potensial proteksi -950 mV, -1094 mV, -882 mV dan -785 mV. Pembebanan elektrik dapat dilihat pada tabel 3 sampai tabel 6 berikut,

**Tabel 3.** Pembebanan Elektrik pada  $V_{\text{prot}} -950 \text{ mV}$

Kondisi proteksi	Beban	Nilai	Keterangan
Potensial proteksi = -0.95 V	Voltase	Sisi anoda = -1.75 V	Potensial anoda terhadap elektrolit
Coating breakdown pipa di daerah $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$		Sisi pipa yang terekspos = $E_{\text{app}} + E_{\text{anode}} = -2.7 \text{ V}$	Potensial pipa terhadap elektrolit dengan $E_{\text{app}} = -0.95 \text{ V}$
	Arus	Sisi batas elektrolit dan insulated pipe = 0 A	Terinsulasi elektrik

**Tabel 4.** Pembebanan Elektrik pada  $V_{\text{prot}} -1094 \text{ mV}$

Asumsi	Beban	Nilai	Keterangan
Potensial proteksi = -1.094 V	Voltase	Sisi anoda = -1.75 V	Potensial anoda terhadap elektrolit
Coating breakdown pipa di daerah $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$		Sisi pipa terekspos = $E_{\text{app}} + E_{\text{anoda}} = -2.844$	Potensial pipa terhadap elektrolit dengan $E_{\text{app}} = -1.094 \text{ V}$
	Arus	Sisi batas elektrolit dan insulated pipe = 0 A	Terinsulasi elektrik

**Tabel 5.** Pembebanan Elektrik pada  $V_{\text{prot}} -882 \text{ mV}$

Kondisi batas	Beban	Nilai	Keterangan
Potensial proteksi = -0.882 V	Voltase	Sisi anoda = -1.75 V	Potensial anoda terhadap elektrolit
Coating breakdown pipa di daerah $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$		Sisi pipa terekspos = $E_{\text{app}} + E_{\text{anode}} = -2.632 \text{ V}$	Potensial pipa terhadap elektrolit dengan $E_{\text{app}} = -0.882 \text{ V}$
	Arus	Sisi batas elektrolit dan insulated pipe = 0 A	Terinsulasi elektrik

**Tabel 6.** Pembebanan Elektrik pada  $V_{\text{prot}} -785 \text{ mV}$

Kondisi batas	Beban	Nilai	Keterangan
Potensial proteksi = -0.785 V	Voltase	Sisi anoda = -1.75 V	Potensial anoda terhadap elektrolit
Coating breakdown pipa di daerah $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$		Sisi pipa yang terekspos = $E_{\text{app}} + E_{\text{anode}} = -2.535 \text{ V}$	Potensial pipa terhadap elektrolit dengan $E_{\text{app}} = -0.785 \text{ V}$
	Arus	Sisi batas elektrolit dan insulated pipe = 0 A	Terinsulasi elektrik

### f. Tipe Analisa

Tipe analisis yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan tipe *steady state*, dimana akan diamati distribusi arus akibat adanya perbedaan potensial.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Evaluasi desain SACP

Setelah dilakukan perhitungan evaluasi desain SACP didapatkan hasil sebagai berikut :

**Tabel 7.** Hasil evaluasi desain SACP

Perhitungan	Nilai
luas permukaan yang diproteksi, $\text{m}^2$	2202,13
kebutuhan arus total, A	0,867
berat total anoda, Kg	145,303
jumlah anoda, buah	11
jarak pemasangan anoda, m	236,89
keperluan arus proteksi untuk jarak antar anoda ( $I_s$ ), A	0,075
tahanan anoda, $\Omega$	5,3
keluaran arus anoda total ( $I_a$ ), A	0,113
$I_s$ vs $I_a$	Terpenuhi

Hasil verifikasi perhitungan ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban *Water Injection Pipeline*, menunjukkan bahwa kebutuhan anoda untuk dapat menyuplai arus sebesar 0,867 A agar dapat memproteksi pipa adalah 11 buah, sedangkan berdasarkan data dari perusahaan dibutuhkan 10 buah. Perbedaan yang terjadi dikarenakan kondisi lingkungan yang berbeda, terutama pada nilai resistivitas tanah sehingga desain SACP perlu dioptimasi

## B. Rancang Ulang Desain SACP

Hasil rancang ulang desain SACP dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 8.** Hasil rancang ulang desain SACP

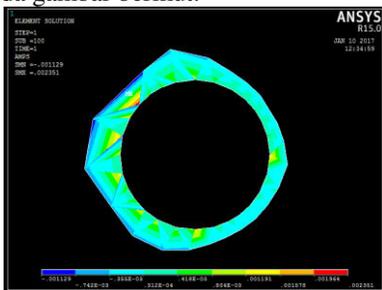
Perhitungan	CPA lama	CPA baru	Sawah	Pad C
$A_c$ (m <sup>2</sup> )	424.18	424.2	1521.2	256.4
I (Ampere)	0.167	0.167	0.5989	0.101
M (Kg)	28.003	28.003	100.4	16.929
n (buah)	2	4	7	2
$S_a$ (m)	251.1	125.55	257.14	151.8
$I_s$ (m)	0.0795	0.039	0.0815	0.048
$\rho$ (ohm)	10.609	10.093	0.9685	4.333
$I_a$ (Ampere)	0.0565	0.05944	0.619	0.138
$I_s < I_a$ (Ampere)	0.0795( $I_s$ ) > 0.0565 ( $I_a$ )	0.039 ( $I_s$ ) < 0.05944 ( $I_a$ )	0.0815 ( $I_s$ ) < 0.619 ( $I_a$ )	0.048 ( $I_s$ ) < 0.138 ( $I_a$ )
Kesimpulan	Tidak terpenuhi	Terpenuhi	Terpenuhi	Terpenuhi

Hasil rancang ulang desain sistem proteksi katodik anoda korban di atas menyatakan bahwa nilai total anoda yang dibutuhkan untuk dapat memproteksi pipa sepanjang CPA-sawah-Pad C adalah 13 buah, dengan distribusi anoda untuk area CPA sebanyak 4 buah (*High Potential Magnesium anode 17 Lb*) sedangkan area sawah membutuhkan anoda 7 buah (*High Potential Magnesium anode 32 Lb*). Sedangkan pada area pad C membutuhkan anoda sebanyak 2 buah (*High Potential Magnesium anode 32 Lb*)

## C. Analisa Distribusi Arus pada Sistem SACP

### a. Simulasi distribusi arus pada potensial proteksi ( $V_{prot}$ ) -950 mV

Pembebanan yang diberikan pada simulasi ini dapat dilihat pada tabel 3 di atas, hasil distribusi arus hasil pembebanan di sekitar pipa pada potensial proteksi -950 mV dapat dilihat pada gambar berikut:



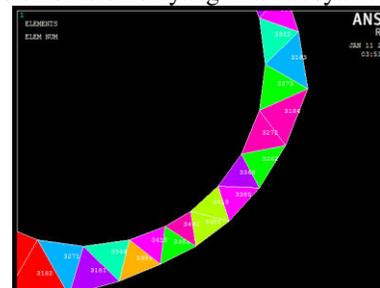
**Gambar 2.** Distribusi arus di sekitar pipa saat  $V_{prot}$  -950 mV

Gambar 2 menunjukkan countour elemen di sekitar pipa yang merepresentasikan nilai arus. Dapat dilihat pada gambar bahwa nilai arus yang ada di sekeliling pipa tidak merata hal ini disebabkan karena beberapa hal, yaitu posisi dan jarak penempatan anoda terhadap pipa<sup>[6]</sup>. Pada jarak yang terlalu jauh arus yang diterima oleh pipa menjadi lebih sedikit<sup>[7]</sup>. Analisis distribusi arus pada potensial proteksi -950 mV menunjukkan bahwa pada setiap elemen yang mengelilingi pipa memiliki nilai kebutuhan arus lebih besar dari kriteria minimal yang disyaratkan, kecuali pada elemen-elemen yang ditunjukkan pada tabel 9 berikut:

**Tabel 9.** Elemen dari pipa dengan arus proteksi dibawah kriteria saat  $V_{prot}$  -950 mV

Nilai arus (A)	Nomor Elemen
Kriteria arus minimal = $3.3 \times 10^{-4}$ A	
$2.50 \times 10^{-5}$	3419
$7.20 \times 10^{-5}$	3386
$8.31E \times 10^{-5}$	3492
$8.63 \times 10^{-5}$	3385
$1.05 \times 10^{-5}$	3368
$1.66 \times 10^{-4}$	3383
$2.00 \times 10^{-4}$	3262
$2.05 \times 10^{-4}$	3418
$2.39 \times 10^{-4}$	3272

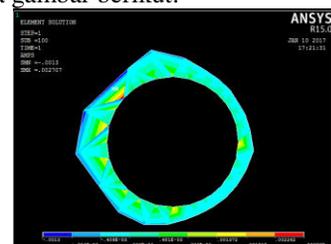
Dari tabel 9, diketahui bahwa terdapat Sembilan elemen yang memiliki nilai arus dibawah kriteria dengan nilai arus terendah adalah  $2.50 \times 10^{-5}$  A pada elemen 3419. Setelah dilakukan analisis terhadap 9 elemen tersebut, diketahui bahwa elemen-elemen tersebut berada pada posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  dari batas pipa. Hal ini berkorelasi dengan sistem yang diaplikasikan dimana pada rentang batas tersebut pipa dikondisikan terisolasi, sehingga nilai arus yang dibutuhkan untuk proteksi lebih sedikit. Sedangkan nilai arus tertinggi yaitu  $2.24 \times 10^{-3}$  A yang terletak pada elemen nomor 2540 Gambar berikut menunjukkan posisi  $270^\circ < \theta < 360$  pada batas pipa dimana elemen-elemen yang nilai arusnya kurang berada,



**Gambar 3.** Elemen di sekitar pipa yang terinsulasi elektrik pada  $V_{prot}$  -950 mV

### b. Simulasi distribusi arus pada potensial proteksi ( $V_{prot}$ ) -1094 mV

Pembebanan yang diberikan pada simulasi ini dapat dilihat pada tabel 4 di atas, hasil distribusi arus hasil pembebanan di sekitar pipa pada potensial proteksi -1094 mV dapat dilihat pada gambar berikut:



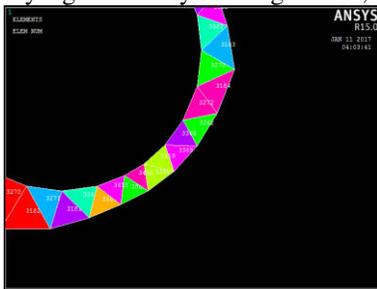
**Gambar 4.** Distribusi arus di sekitar pipa saat  $V_{prot}$  -1094 mV

Hasil simulasi proteksi katodik menunjukkan terjadinya perbedaan dalam nilai arus yang berada di sekeliling pipa. Arus keluaran dari anoda dipengaruhi oleh tahanan tanah<sup>[5]</sup>. Analisis distribusi arus pada potensial proteksi -1094 mV menunjukkan bahwa pada setiap elemen yang mengelilingi pipa memiliki nilai kebutuhan arus lebih besar dari kriteria minimal yang disyaratkan, kecuali pada elemen-elemen yang ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 10.** Elemen dari pipa dengan arus proteksi dibawah kriteria saat  $V_{prot} -1094$  mV

Nilai arus (A)	Nomor Elemen
Kriteria arus minimal = $3.3 \times 10^{-4}$ A	
$2.88 \times 10^{-5}$	3419
$8.29 \times 10^{-5}$	3386
$9.57 \times 10^{-5}$	3492
$9.81 \times 10^{-5}$	3385
$1.21 \times 10^{-5}$	3368
$1.91 \times 10^{-4}$	3383
$2.30 \times 10^{-4}$	3262
$2.36 \times 10^{-4}$	3418
$2.75 \times 10^{-4}$	3272

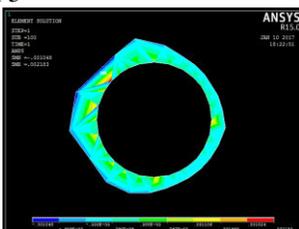
Hasil pada tabel 10 berkorelasi dengan simulasi pada potensial proteksi -950 mV. Hal ini mengindikasikan korelevansi karena berdasarkan analisis sembilan elemen tersebut terletak pada batas pipa pada posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  yang merepresentasikan area *tercoating*, oleh karena arus dalam sistem proteksi katodik bekerja pada saat *coating* sedang rusak, sehingga pada kondisi *coating* yang masih bagus arus proteksi yang dibutuhkan sedikit<sup>[4]</sup>. Gambar berikut menunjukkan posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  pada batas pipa dimana elemen-elemen yang nilai arusnya kurang berada,



**Gambar 5.** Elemen yang terinsulasi elektrik pada  $V_{prot} -1094$  mV

c. Simulasi distribusi arus pada potensial proteksi ( $V_{prot}$ ) -882 mV

Pembebanan yang diberikan pada simulasi ini dapat dilihat pada tabel 5



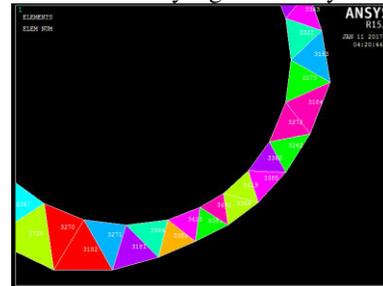
**Gambar 6.** Distribusi arus di sekitar pipa hasil simulasi pada  $V_{prot} -882$  mV

Gradien warna yang berada di sekitar pipa menunjukkan nilai arus yang berbeda-beda pada setiap posisi. Dimana nilai arus terbesar terdapat pada elemen nomor 2540 pada posisi  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  dengan nilai arus sebesar  $2.58 \times 10^{-3}$  A.

**Tabel 11.** Elemen dari pipa dengan arus proteksi dibawah kriteria saat  $V_{prot} -882$  mV

Nilai arus (A)	Nomor Elemen
Kriteria arus minimal = $3.3 \times 10^{-4}$ A	
$2.32 \times 10^{-5}$	3419
$6.69 \times 10^{-5}$	3386
$7.72 \times 10^{-5}$	3492
$8.01 \times 10^{-5}$	3385
$9.74 \times 10^{-5}$	3368
$1.54 \times 10^{-5}$	3383
$1.86 \times 10^{-5}$	3262
$1.90 \times 10^{-5}$	3418
$2.22 \times 10^{-5}$	3272

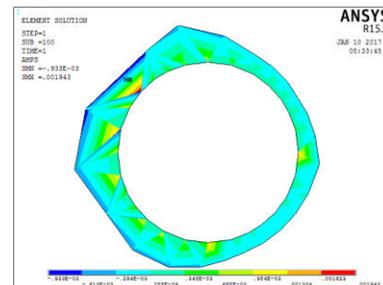
Setelah dilakukan analisa terhadap elemen yang ada pada tabel 11 diketahui bahwa elemen tersebut terletak pada posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  yang merepresentasikan area yang *dicoating*, sehingga kondisi ini dapat diterima, karena pada daerah yang dilapisi membutuhkan arus proteksi yang lebih sedikit<sup>[5]</sup>. Gambar berikut menunjukkan posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  pada batas pipa dimana elemen-elemen yang nilai arusnya kurang berada,



**Gambar 7.** Elemen yang terinsulasi elektrik pada  $V_{prot} -882$  mV

d. Simulasi distribusi arus pada potensial proteksi -785 mV

Pembebanan yang diberikan pada simulasi ini dapat dilihat pada tabel 6



**Gambar 8.** Distribusi arus proteksi di sekitar pipa ketika  $V_{prot} -785$  mV

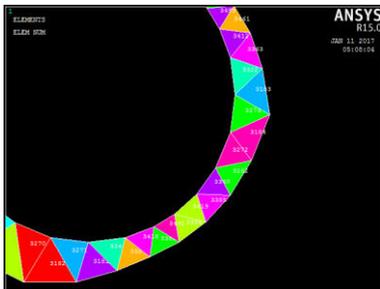
Gambar 8 menunjukkan distribusi arus di sekitar pipa dengan potensial proteksi sebesar -785 mV yang direpresentasikan oleh elemen-elemen. Nilai arus tertinggi terdapat pada elemen nomor 2540 dengan nilai arus sebesar

$1.85 \times 10^{-3}$  A. Sedangkan nilai arus yang berada dibawah batas proteksi dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 12.** Elemen dari pipa dengan arus proteksi dibawah kriteria saat  $V_{prot} -882$  mV

Nilai arus (A)	Nomor Elemen
Kriteria arus minimal = $3.3 \times 10^{-4}$ A	
$2.07 \times 10^{-5}$	3419
$5.95 \times 10^{-5}$	3386
$6.87 \times 10^{-5}$	3492
$7.13 \times 10^{-5}$	3385
$8.67 \times 10^{-5}$	3368
$1.37 \times 10^{-4}$	3383
$1.65 \times 10^{-4}$	3262
$1.69 \times 10^{-4}$	3418
$1.97 \times 10^{-4}$	3272
$3.00 \times 10^{-4}$	3489

Setelah dilakukan analisis didapatkan hasil bahwa elemen dengan nomor 3419, 3386, 3492, 3385, 3368, 3383, 3262, 3418, 3272 merupakan elemen yang terletak pada posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$  pada batas pipa dimana area ini merupakan area yang terisolasi sehingga kebutuhan arus yang dibutuhkan pun akan lebih kecil dibandingkan kebutuhan arus minimal proteksi<sup>[8]</sup>. Sehingga hal tersebut wajar terjadi. Sedangkan elemen 3489 dengan nilai arus  $3.00 \times 10^{-4}$  Ampere merupakan elemen yang ada dalam posisi  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  area yang seharusnya menerima arus proteksi di atas dari batas minimal yang disyaratkan. Namun arus yang didapat pada elemen tersebut dibawah batas minimal untuk proteksi. Sehingga pada kondisi potensial proteksi -785 mV sistem tidak terproteksi. Hal ini sesuai dengan standar NACE SP 0169 bahwa potensial proteksi harus berada pada range -850 sampai dengan -1050 mV. Gambar berikut menunjukkan region yang merepresentasikan area yang terisolasi yakni pada posisi  $270^\circ < \theta < 360^\circ$



**Gambar 9.** Elemen yang terinsulasi elektrik pada potensial proteksi -785 mV

Setelah dilakukan empat simulasi sistem proteksi katodik pada kondisi sistem proteksi katodik yang berbeda didapat bahwa semakin tinggi nilai potensial proteksi menyebabkan perbedaan potensial antara katoda dan anoda menjadi semakin tinggi pula sehingga *driving force* juga semakin besar yang menyebabkan keluaran arus menjadi semakin besar.

#### IV. KESIMPULAN

Dengan dilakukannya rancang ulang desain proteksi katodik anoda korban pada water injection pipeline dari CPA-Sawah-Pad C didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Evaluasi desain SACP menunjukkan bahwa perhitungan desain hasil evaluasi dengan yang diterapkan oleh perusahaan masih relevan. Namun, kondisi lingkungan tanah yang berbeda, khususnya resistivitas tanah menyebabkan perlu dilakukan optimasi desain.
2. Hasil rancang ulang desain SACP menyatakan dibutuhkan 13 buah anoda *high magnesium anode* dengan konfigurasi sebagai berikut: area CPA membutuhkan 4 buah anoda (17 lb) dengan jarak antar anoda 125.5 m dengan keluaran arus dari setiap anoda adalah 0.0594 A, area sawah membutuhkan 7 buah anoda (32 lb) dengan jarak pemasangan 257.143 m dan arus keluaran tiap anoda sebesar 0.619 A, dan area pad C dengan jumlah anoda 2 buah (32 lb) yang berjarak sejauh 151.8 m dengan arus keluaran dari tiap anoda sebesar 0.138 A.
3. Simulasi 2D dari area pad C menunjukkan bahwa desain rancang ulang dapat diterima dengan potensial proteksi berada pada *range* -850 mV sampai dengan -1050 mV sesuai standar NACE SP 0169 dengan keluaran arus minimal sebesar  $3.33 \times 10^{-4}$  A.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmad, Z., 2006. *Principles Of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Burlington, MA 01803, USA: Elsevier.
- [2] Corpro Companies Europe, 2016. *Corpro*. [Online]
- [3] -----, 2010. DNV-RP-B401: *Cathodic Protection Design*. (Det Norske Veritas).
- [4] -----, 1997. IPS-E-TP-270 : *Engineering Standard for Protective Coatings for Buried and Submerged Steel Structure*, s.l.: Iranian Ministry of Petroleum.
- [5] Ibrahim M. Gadala, M. A. W. A. A., 2015. Numerical Simulations of Soil Physicochemistry and Aeration influences on the External Corrosion and Cathodic Protection Design of Buried Pipeline Steels. *Materials and Design*.
- [6] Peabody, A., 1967. *Control of Pipeline Corrosion*. 2nd ed. United States of America: NACE Press.
- [7] Iswahyudi, 2008. *Desain Sistem Proteksi Katodik dengan Anoda Tumbal Sebagai Pengendali Laju Korosi Baja pada Jaringan Pipa Pertamina UPMS V. Tiugas Akhir*, s.l.: Institut Teknologi Sepuluh Nopemner.
- [8] Baboian, R., 2002. *NACE Corrosion Engineer's Reference Book*. 3rd ed. Houston: NACE International