

**PENGARUH JARAK DAN PERBANDINGAN LUAS ELEKTRODA  
TERHADAP EFEKTIVITAS PENCEGAHAN KOROSI PADA *IMPRESSED  
CURRENT CATHODIC PROTECTION (ICCP)***

**SKRIPSI**

**Konsentrasi Teknik Produksi**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

**SOFY ARDHIYANTI  
0001063188 - 62**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**JURUSAN MESIN**

**MALANG**

**2007**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis sadar bahwa banyak pihak yang telah membantu didalam pengerjaan karya tulis ilmiah ini. Untuk itu ucapan terima kasih yang tulus penulis haturkan kepada :

- Bapak Slamet Wahyudi, ST, MT, DR selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya memberikan bimbingan dan masukan pada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
- Bapak Ir. Marsoedi Wirohardjo, MMT, selaku dosen pembimbing I yang banyak memberikan bimbingan dan masukan pada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
- Bapak Ir. Endi Sutikno, MT, selaku dosen pembimbing II yang juga telah banyak memberikan sumbangan pemikiran, bimbingan dan masukan pada penulis
- Bapak Ir. Djarot B. Darmadi MT, selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Produksi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas masukan-masukannya.
- Bapak Abdul Hadi DJ.IR, selaku dosen wali yang banyak memberi masukan-masukan,nasehat dan juga bimbingan pada penulis.
- Bapakku (T.Paiman),Ibuku (Tati Sutarti), Masku (Teguh Budiantoro. ST), Mbakku (Ria Anggriani. SE) yang telah memberikan segalanya yang terbaik untuk penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
- Tuk seseorang yang terkasih dan tersayang dihidupku ‘S.W’ yang banyak memberiku dukungan dan selalu ngebuat aku semangat makasih banyak tuk semuanya, dan tuk teman2 koe Abang Kodok, Kristin, Oriza, Friska, Dwi Wahyudi, Kurocan, Jontang, Catur, Theo, Erik, Ableh, Hendra, Alek, Haryo, Yuli, Yudi Arianto, Erno Dan Semua2nya Arek mesin brawijaya yang telah membantu demi kelancaran pengerjaan skripsi ini dan Penyusun menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, karena itu kritik dan saran sangat kami harapkan untuk kesempurnaan skripsi ini.

Malang, 6 Agustus 2007

Penyusun

## DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR .....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL.....	iv
DAFTAR GAMBAR .....	v
RINGKASAN .....	vi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Korosi .....	4
2.2. Jenis Korosi .....	4
2.3. Pengendalian korosi .....	6
2.4. Reaksi Elektrokimia .....	9
2.4.1. Sel Elektrokimia .....	9
2.4.1.1. Sel Galvani .....	9
2.4.1.2. Sel elektrolisis .....	11
2.4.2. Potensial Elektroda .....	11
2.4.3. Elektroda Hidrogen Standar Sebagai Elektroda Pemanding .....	13
2.4.4. Elektroda pembanding selain hidrogen .....	14
2.5. Proteksi Katodik .....	14
2.6. Hipotesa .....	19
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Metode Penelitian .....	20
3.2 Variabel Yang Diteliti .....	20
3.2.1 Variabel Bebas .....	20
3.2.2 Variabel Kontrol .....	20

3.2.3	Variabel Terikat .....	20
3.3	Skema Alat Penelitian .....	21
3.4	Benda Kerja .....	21
3.5	Alat penelitian .....	22
3.6	Prosedur penelitian.....	23
3.7	Rancangan Pengolahan data Penelitian .....	24
3.7.1	Uji Kecukupan Data Observasi .....	25
3.7.2	Analisis Varian .....	26
3.7.3	Analisis Regresi .....	30
3.7.4	Analisis Grafik .....	30

#### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Data Penelitian Hasil Pengujian Tingkat Proteksi Sistem ICCP .....	31
4.2	Analisis statistik .....	32
4.2.1	Uji Kecukupan Data Observasi .....	32
4.2.2	Analisis Varian .....	34
4.2.3	Analisis Regresi .....	39
4.2.3.1	Analisa Regresi Variasi Jarak .....	39
4.2.3.2	Analisa Regresi Perbandingan luasan (K/A) .....	42
4.3	Pembahasan .....	46
4.3.1	Analisa Grafik Hubungan Antara Jarak Elektroda Terhadap Tingkat Proteksi Sistem ICCP .....	46
4.3.2	Analisa Grafik Hubungan Antara Perbandingan Luasan (K/A) Terhadap Tingkat Proteksi Sistem ICCP .....	47
4.3.3	Analisa Grafik Interaksi Antara Jarak dan Perbandingan Luasan (K/A) Terhadap Tingkat Proteksi sistem ICCP .....	48

#### **BAB V PENUTUP**

5.1	Saran .....	49
5.2	Kesimpulan .....	49

#### **DAFTAR PUSTAKA .....**

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b>	<i>Impressed Current</i> .....	1
<b>Gambar 1.2</b>	Proteksi katodik galvanik .....	2
<b>Gambar 1.3</b>	Effect of cathode-to-anode (C/A) ratio on galvanic corrosion. ....	2
<b>Gambar 2.1.</b>	Sel Daniell .....	10
<b>Gambar 2.2.</b>	Sel Daniell dengan jembatan garam .....	10
<b>Gambar 2.3</b>	Pengukuran potensial elektroda standar .....	13
<b>Gambar 2.4</b>	Proteksi katodik mode anoda korban .....	15
<b>Gambar 2.5</b>	Proteksi katodik mode arus tanding .....	15
<b>Gambar 3.1.</b>	Skema alat penelitian .....	21
<b>Gambar 3.2</b>	Benda kerja .....	21
<b>Gambar 3.3.</b>	Diagram alir pengerjaan tugas akhir .....	23
<b>Gambar 3.4.</b>	Diagram alir penelitian .....	24
<b>Gambar 4.1</b>	Grafik hubungan antara jarak elektroda terhadap tingkat proteksi sistem ICCP.....	46
<b>Gambar 4.2</b>	Grafik hubungan perbandingan luasan (K/A) terhadap tingkat proteksi sistem ICCP .....	47
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik interaksi jarak dan perbandingan luasan (K/A) terhadap tingkat proteksi sistem ICCP .....	48

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Kelemahan dan kelebihan sistem proteksi katodik .....	18
<b>Tabel 3.1</b> Format Tabel Uji Kecukupan Data Observasi .....	22
<b>Tabel 3.2.</b> Rancangan Hasil pengujian uji kekerasan dengan lebih dari satu kali pengamatan .....	27
<b>Tabel 3.3.</b> Tabel Rancangan Analisis Varian Dua Arah .....	29
<b>Tabel 4.1.</b> Data potensial ( mV vs Ag ) .....	31
<b>Tabel 4.2</b> Data hasil pengujian tingkat proteksi ICCP pada variasi jarak 10 cm dan perbandingan luasan 0,33 .....	32
<b>Tabel 4.3.</b> Uji kecukupan data observasi .....	34
<b>Tabel 4.4</b> Hasil Analisis Varian Dua arah .....	36
<b>Tabel 4.5</b> Verifikasi analisis varian menggunakan program Microsoft Excel .....	37
<b>Tabel 4.6</b> Data regresi pada variasi perbandingan luasan $(K/A) = 0,33$ .....	39
<b>Tabel 4.7</b> Perhitungan koefisien korelasi pada variasi jarak 10 cm .....	41
<b>Tabel 4.8</b> Regresi untuk variasi perbandingan luasan pada jarak 10 cm .....	43
<b>Tabel 4.9</b> Perhitungan Koefisien untuk variasi perbandingan pada jarak 10 cm ....	44

## RINGKASAN

SOFY ARDHIYANTI, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2007, *Studi Eksperimental Pengaruh Jarak Dan Perbandingan Luas Elektroda Terhadap Tingkat Pencegahan Korosi Pada Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*. Dosen Pembimbing: Ir. Marsoedi Wirohardjo. MMT dan Ir.Endi Sutikno. MT

Salah satu metode proteksi katodik adalah dengan *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) atau dikenal dengan sebutan metode arus tanding. Metode ini membuat arus listrik eksternal mengalir dari suatu anoda menuju logam yang diproteksi yang berfungsi sebagai katoda menandingi arus listrik galvanisnya agar diperoleh potensial yang lebih negatif pada katoda dibanding lingkungan. Dengan semakin negatif katoda terhadap lingkungan maka kecenderungan untuk teroksidasi akan semakin kecil sehingga katoda tersebut akan tahan terhadap korosi.

Penelitian ini mencoba membandingkan potensial pada katoda akibat variasi jarak dan perbandingan luasan antar elektroda. Percobaan dilakukan dengan memvariasikan jarak dan perbandingan luasan antara katoda dengan anoda, sedangkan variabel lainnya dikonstantakan.

Setelah dilakukan percobaan didapatkan bahwa semakin dekat jarak antar elektroda dan semakin besar perbandingan antara luasan katoda dibanding anoda, maka potensial terhadap lingkungannya akan semakin negatif (menurun) sehingga efektivitas proteksi terhadap korosinya semakin meningkat

Kata kunci: ICCP, Jarak, Perbandingan Luasan, Efektivitas proteksi.

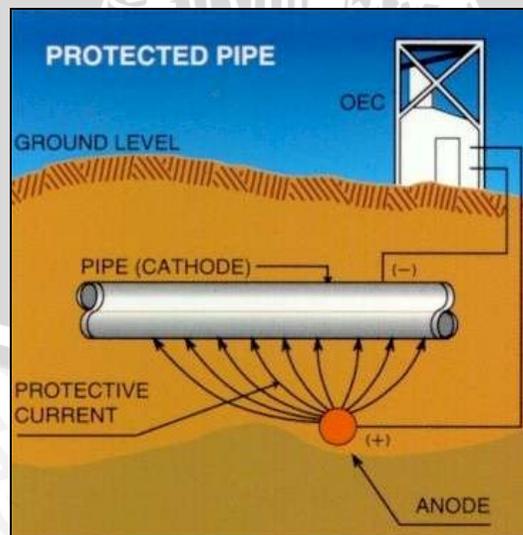
## BAB I PENDAHULUAN

### 1.5 Latar Belakang

Hasil alam letaknya tidak selalu pada daerah yang strategis untuk dibangun alat-alat produksi untuk mengeksplorasinya. Minyak bumi misalnya, sering kali dijumpai terletak di kawasan laut, sehingga banyak dikembangkan sistem-sistem untuk mengatasi masalah yang terjadi dalam eksplorasi hasil alam yang berada di tengah lautan tersebut.

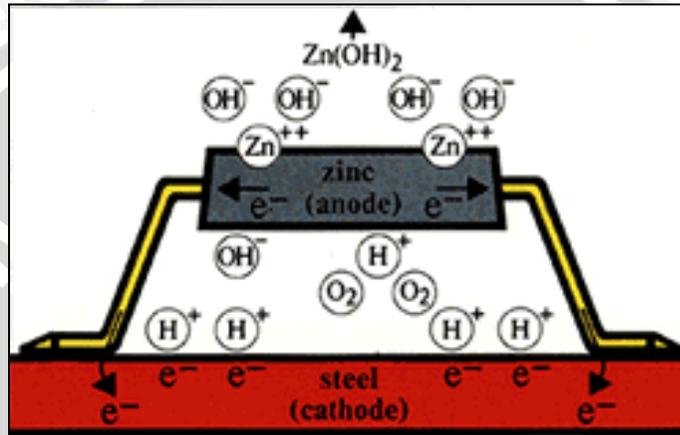
Air laut merupakan elektrolit yang dapat menghancurkan logam secara cepat dengan reaksi elektrokimia yang umum disebut korosi. Oleh sebab itu korosi logam pada air laut sering menjadi kendala yang harus diatasi terlebih dahulu apabila akan merancang mesin-mesin untuk ditempatkan di daerah tersebut. Cara yang umum digunakan untuk mengatasi masalah korosi akibat air laut diantaranya adalah dengan pematuan logam, pelapisan logam, inhibitor dan proteksi katodik.

Proteksi katodik adalah salah satu cara memproteksi suatu logam dari serangan korosi dengan cara membuat logam tersebut menjadi lebih elektro negatif, sebab dengan menjadi lebih elektro negatif maka logam tersebut tidak akan teroksidasi. Salah satu metode proteksi katodik adalah dengan *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* yakni membuat arus listrik mengalir dari suatu anoda menuju logam yang diproteksi yang juga sebagai katoda. Cara ini biasa dilakukan di dalam tanah seperti pada gambar 1.1 berikut:



**Gambar 1.1** *Impressed Current*  
(Northern Arizona Wind & Sun, Inc, 2006)

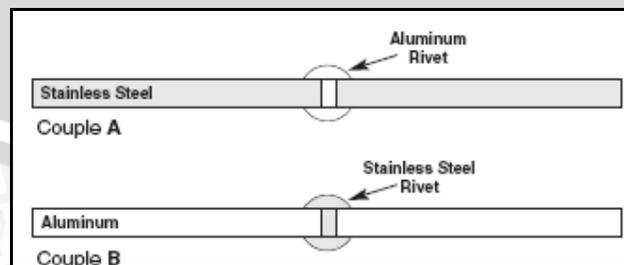
Pada gambar 1.1 di atas, pipa akan terjaga dari serangan korosi karena pipa berposisi sebagai katoda, walaupun terdapat bahan kimia yang mempunyai potensial reduksi lebih tinggi di sekitar pipa, elektron tetap akan mengalir dari katoda menuju anoda karena terdapat arus listrik yang dialirkan yang berasal dari pembangkit listrik. Cara yang lain untuk membuat suatu logam menjadi katoda adalah dengan sistem galvanik yakni pemasangan logam yang mempunyai potensial reduksi lebih rendah untuk ditumbalkan seperti pada gambar 1.2 berikut.



**Gambar 1.2** Proteksi katodik galvanik  
(Northern Arizona Wind & Sun, Inc, 2006)

Cara proteksi katodik seperti pada gambar 1.2 diatas mempunyai kendala pada keterbatasan masa anoda tumbal. Jika logam yang diproteksi berada pada daerah yang sulit terjangkau misal pada air laut yang sangat dalam, maka cara ini dinilai kurang baik karena harus sering mengganti tumbal karena sudah habis.

Korosi dapat terjadi akibat dua logam tak sejenis yang tergabung membentuk suatu sel korosi basah. Korosi ini umum disebut sebagai korosi galvanis, dan semua korosi di lingkungan air bersifat galvanik.



**Gambar 1.3** Effect of cathode-to-anode (C/A) ratio on galvanic corrosion.  
(Stephen,2005)

Coupelel A mempunyai perbandingan kuantitas katoda banding anoda (K/A) lebih besar daripada B sehingga akan lebih mudah terserang korosi.

Dengan melakukan suatu percobaan penelitian, maka faktor-faktor yang mempengaruhi hasil dari proteksi katodik dapat diketahui serta dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi mahasiswa dan perkembangan teknologi pencegahan korosi.

### 1.6 Rumusan Masalah

Bagaimana pengaruh jarak dan perbandingan luas elektroda terhadap efektivitas pencegahan korosi pada ICCP ?

### 1.7 Tujuan Penelitian

Mendapatkan pengaruh jarak dan perbandingan luas elektroda terhadap tingkat pencegahan korosi pada ICCP

### 1.8 Manfaat Penelitian

Bagi mahasiswa, hasil penelitian ini dapat memberikan pengetahuan tentang pencegahan korosi dan bagi engineer, penelitian ini bermanfaat dalam upaya menjaga keselamatan kerja dan mengurangi biaya perawatan mesin.

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.7. Korosi

Korosi merupakan kerusakan atau menurunnya mutu logam akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. Korosi pada dasarnya dapat dibedakan menjadi korosi eksternal dan korosi internal. Korosi terjadi bila terpenuhi sejumlah syarat yaitu (1) terdapat anoda, (2) terdapat katoda dan (3) terdapat elektrolit yang memungkinkan terjadinya atau adanya (4) hubungan arus listrik antara anoda dan katoda, jika salah satu dari unsur di atas tidak ada atau tidak terpenuhi, maka korosi tidak akan terjadi.

Pada korosi eksternal, pipa atau peralatan lainnya yang terbuat dari logam (besi) akan bertindak sebagai anoda (tempat dimana korosi terjadi), sementara katodanya antara lain adalah oksigen ( $O_2$ ), sedangkan elektrolitnya antara lain tanah, genangan air, dan sebagainya. Untuk mengatasi korosi eksternal dapat dilakukan dengan berbagai cara diantaranya adalah dengan proteksi katodik.

Korosi internal dapat disebabkan oleh bermacam faktor antara lain adanya oksigen terlarut (*dissolved oxygen*), bakteri SRB (*Sulfate Reducing Bacteria*), dan sebagainya. Untuk mencegah terjadinya korosi internal, dapat dilakukan dengan berbagai cara tergantung pada penyebab terjadinya korosi internal tersebut antara lain:

1. Dengan menginjeksikan bahan kimia yang disebut *corrosion inhibitor* yang bahan kimia ini akan melapisi permukaan pipa dengan film sehingga dapat memperlambat terjadinya korosi.
2. Dengan menggunakan *oxygen scavenger* untuk meminimalkan jumlah oksigen terlarut.
3. Menggunakan *biocide* untuk mengurangi jumlah bakteri SRB

#### 2.8. Jenis Korosi

Jenis korosi dapat dibedakan menjadi:

1. Korosi logam tak sejenis

Korosi ini terjadi akibat dua logam tak sejenis yang tergabung membentuk suatu sel korosi basah. Korosi ini umum disebut sebagai korosi galvanik, dan semua korosi di lingkungan air bersifat galvanik.

## 2. Korosi batas butir (*intergranular corrosion*)

Korosi batas butir terjadi akibat perbedaan tingkat energi antara atom-atom pada batas butir dengan atom-atom pada butiran. Salah satu jenis cacat yang nyata adalah pada batas butir yang terbentuk akibat proses pembekuan dan perlakuan panas. Atom dalam wujud padat mendapatkan tingkat energi terendahnya hanya bila menempati suatu kedudukan dalam kisi kristal yang sempurna, bila terjadi cacat akan mempunyai energi bebas lebih positif sehingga serangan korosi pada logam lebih mudah terjadi.

## 3. Korosi celah (*crevice corrosion*)

Korosi celah adalah korosi yang terjadi karena sebagian permukaan logam terhalang dari lingkungan.

## 4. Korosi sumuran (*pitting corrosion*)

Korosi ini bersifat lokal, menyerang secara selektif pada bagian permukaan logam yang mempunyai selaput pelindung tergores atau retak akibat perlakuan mekanis, atau yang mempunyai tonjolan akibat dislokasi (slip) yang disebabkan oleh tegangan yang dialami.

## 5. Korosi erosi (*erosion corrosion*)

Korosi ini diakibatkan oleh gejala relatif antara elektrolit dan permukaan logam. Logam-logam lunak lebih mudah terkorosi misalnya tembaga, kuningan, aluminium dan timbal. Meskipun proses kimia juga berlangsung, banyak contoh bentuk korosi yang terutama disebabkan oleh efek-efek mekanik seperti pengausan, abrasi dan gesekan.

## 6. Korosi tegangan (*stress corrosion cracking*)

Peretakan korosi tegangan adalah intergranular atau transgranular pada logam akibat adanya tegangan beban atau tegangan sisa yang bekerja dan lingkungan yang bersifat asam.

## 7. Korosi karena kelelahan (*corrosion fatigue*)

Korosi jenis ini terjadi pada komponen yang menderita beban berulang dalam lingkungan asam. Pada umumnya logam akan mengalami beban dinamis (berulang) dengan tingkat tegangan jauh di bawah tegangan statiknya.

## 2.9. Pengendalian korosi

Peristiwa korosi pada logam merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari, namun dapat dihambat maupun dikendalikan untuk mengurangi kerugian dan mencegah dampak negatif yang diakibatkannya. Dengan penanganan ini umur produktif peralatan manufaktur menjadi panjang sesuai dengan yang direncanakan, bahkan dapat diperpanjang untuk memperoleh nilai ekonomi yang lebih tinggi. Upaya penanganan korosi diharapkan dapat banyak menghemat biaya operasional, sehingga berpengaruh terhadap efisiensi dalam suatu kegiatan industri.

Memilih bahan yang paling tahan korosi untuk lingkungan yang dihadapi tidak dapat menyelesaikan masalah secara tuntas, sebab harus pula dipertimbangkan berbagai hal lain dalam aktivitas industri terutama masalah ekonomi (harga bahan). Dalam suatu rancangan yang optimum sekalipun dengan berbagai cara proteksi (misal dengan menggunakan pelindung dari zat yang membentuk film tipis anti korosi, *protective thin film*) dan pengendalian terhadap korosi (pengendalian lingkungan dengan pengaturan pH larutan, dan lain-lain), reaksi korosi masih dapat terjadi, bahkan dapat melampaui prediksi yang telah diperkirakan sebelumnya. Korosi perlu dipantau secara periodik, demikian pula upaya penghambatan dan pencegahannya yang terintegrasi dengan program perawatan dan perbaikan untuk memperoleh hasil yang maksimum. Pada dasarnya korosi adalah reaksi pelarutan (*dissolution*) logam menjadi ion pada permukaan logam yang berkontak dengan lingkungan yang mengandung air (*moisture*) dan oksigen melalui reaksi elektrokimia. Permukaan logam akan diselaputi oleh lapisan oksida tipis yang tersebar tidak merata yang mengakibatkan terjadinya perbedaan potensial antara sistem dengan oksidanya menjadi suatu sel korosi (sel elektrokimia). Berikut adalah contoh korosi pada besi.

1. Di anoda terjadi pelarutan besi (Fe) menjadi ion  $\text{Fe}^{2+}$  :



2. Di katoda terjadi reaksi :



untuk lingkungan (larutan) netral atau basa, dan untuk lingkungan (larutan) asam adalah:



Reaksi tersebut terjadi secara bertahap dan sebenarnya terjadi juga berbagai reaksi lanjutan dalam larutan. Pada peristiwa korosi ringan, ion besi yang terbentuk di anoda

akan teroksidasi membentuk ferrokksida (*gamma iron oxide*) berbentuk lapisan sangat tipis menempel pada permukaan logam dan mencegah terlarutnya besi lebih lanjut :



Demikian juga pada katoda, oksigen harus mencapai permukaan logam agar reaksi (2-2) dan (2-4) terjadi. Ion hidroksin yang terbentuk juga dapat terserap pada permukaan membentuk lapisan yang menghalangi penyerapan oksigen. Pada keadaan ini terjadi polarisasi katoda dan proses korosi berjalan lambat. Pada peristiwa korosi yang cepat, lapisan penghambat (pelindung) tersebut tidak sempat terbentuk, ion Fe beraksi dengan ion hidroksil :



Ferrihidrokksida terendapkan pada permukaan dan menutupi atau mencegah terbentuknya lapisan pelindung (lingkungan di bawahnya menjadi anaerob, memungkinkan kegiatan mikrobia anaerob meningkat). Adanya bahan lain di media yang berhubungan dengan permukaan anoda dan katoda tentu saja mempengaruhi berbagai reaksi tersebut. Garam yang terlarut akan menyebabkan kenaikan daya hantar listrik larutan, sehingga mempertinggi kecepatan larut garam. Bahan yang menutupi sebagian permukaan akan menyebabkan perubahan konsentrasi oksigen, garam, pH dan lain-lainnya yang dapat membentuk sel elektrokimia baru yang mempertinggi kecepatan korosi (logam semakin cepat rusak).

Secara umum bentuk korosi diklasifikasikan sebagai korosi normal dan korosi pada tempat tertentu. Contoh korosi pada tempat tertentu adalah korosi permukaan, sambungan, celah, galvanik, lubang, antarbutir, retak tegangan, kelelahan bahan dan sebagainya. Sedangkan faktor yang berpengaruh terhadap korosi dapat dibedakan menjadi yang berasal dari bahan itu sendiri dan yang berasal dari lingkungan:

1. Faktor dari bahan: kemurnian dan unsur kelumit yang ada dalam bahan, komponen pencampur, struktur material, bentuk kristal, kerusakan permukaan butir, batas butir, ukuran butir, kekasaran permukaan, pengerjaan dingin, dan perlakuan panas
2. Faktor dari lingkungan: lingkungan laut, kandungan garam terlarut, tingkat pencemaran udara, suhu, kelembaban udara relatif, curah hujan, dan pengaruh mikrobia.

Dari uraian di atas dapat difahami bahwa pengendalian korosi pada dasarnya adalah pengendalian atau pemilihan bahan, perlakuan permukaan bahan, dan pengendalian lingkungan. Logam mulia seperti Pt, Au, Ag, Cu dan logam yang permukaannya dapat membentuk lapisan tipis (film) seperti Ni, Al, dan Cr mempunyai daya tahan relatif

tinggi terhadap korosi. Demikian pula logam paduan dari Cu-Zn, Cu-Sn, dan stainless steel (304, 316, 430) sering digunakan sebagai bahan antikorosi. Perlakuan permukaan panas dengan pemanasan, pengapian dan nitrida sering dilakukan untuk memperoleh sifat antikorosi bahan. Pemberian bahan anti korosi pada permukaan (pengecatan atau pemberian lapisan pelindung) dan penambahan penghambat korosi dalam larutan adalah salah satu cara pengendalian, penghambatan, dan pencegahan korosi. Cara lain adalah penggunaan arus listrik dari luar dan anoda umpan (*sacrificial anode*). Perlakuan terhadap permukaan bahan, atau modifikasi permukaan bahan dengan pembentukan lapisan tipis dipermukaan banyak dilakukan dengan berbagai teknik yang berikut :

- a. *Hot dipping*: Zn, Sn, Al, Pb-Sn dan lain-lain untuk anoda
- b. *Electroplating*: Zn, Sn, Cu, Ni, Cr, Au
- c. *Diffusion Coating*: Cr (khromisasi), Al (kalorisasi), Zn (sherardisasi)
- d. *Chemical plating*: Cu, Au, Ni, dan lain-lain.
- e. *Vapour plating*: Evaporasi deposisi, *sputtering*, *ceramics coating* dari Sic dengan CVD dan TIC, TIN dengan proses PVD
- f. *Chemical conversion*: *Phosphating*, *chromating*
- g. Anodisasi: Anodisasi dengan Al, stainless steel dan Ti
- h. *Enamel painting*: *Molten inorganic glass coating* pada permukaan baja
- i. *Painting*: cat, karet, pelapisan dengan plastik
- j. *Cladding*: pengelongsongan, penggabungan dua plat

Pencegahan dan penghambatan korosi melalui pengendalian lingkungan dapat dilakukan dengan menjaga kelembaban udara serendah mungkin. Pengurangan kandungan oksigen dalam cairan netral dapat dilakukan misalnya dengan memanaskan cairan, menurunkan tekanan, menambahkan zat penghilang oksigen (*deoxidizers*) dan lain-lain. Pengendalian pH larutan juga sangat penting artinya bagi pencegahan korosi.

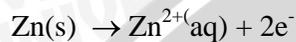
Laju korosi dapat pula dikurangi dengan menambahkan zat penghambat (*inhibitor*) korosi ke dalam cairan. Penghambat ini dapat mempengaruhi dua hal: (1) adanya anoda yang berfungsi menghambat kecepatan larut logam, dan (2) adalah katoda yang berfungsi menghambat kecepatan reaksi oksidasi. Bahan kimia, misal  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{NaNO}_2$ , dan  $\text{NaMoO}_4$  dapat digunakan sebagai anoda penghambat korosi, sedangkan  $\text{ZnSO}_4$  dan juga  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_4$  dapat digunakan sebagai katoda penghambat korosi. Bahan kimia lain seperti  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  dapat pula digunakan untuk menghambat korosi karena membentuk film. Selanjutnya ada pula pencegahan korosi dengan cara elektrik, yaitu mengatur potensial elektrokimia logam. Sebagai contoh, besi stabil pada potensial di

bawah  $-0,7$  V, juga bentuk oksidanya seperti  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  bersifat pasif di atas  $0$  V dalam lingkungan netral pada pH 7.

## 2.10. Reaksi Elektrokimia

Elektrokimia mempelajari hubungan antara reaksi kimia dan aliran listrik (Jurusan pendidikan kimia, 2002). Reaksi yang dimaksud adalah reaksi yang melibatkan adanya pelepasan dan penerimaan elektron atau yang dikenal dengan reaksi oksidasi dan reduksi. Reaksi oksidasi merupakan reaksi yang disertai dengan pelepasan elektron.

Contoh :



Reaksi reduksi merupakan reaksi yang disertai dengan penerimaan elektron.

Contoh :



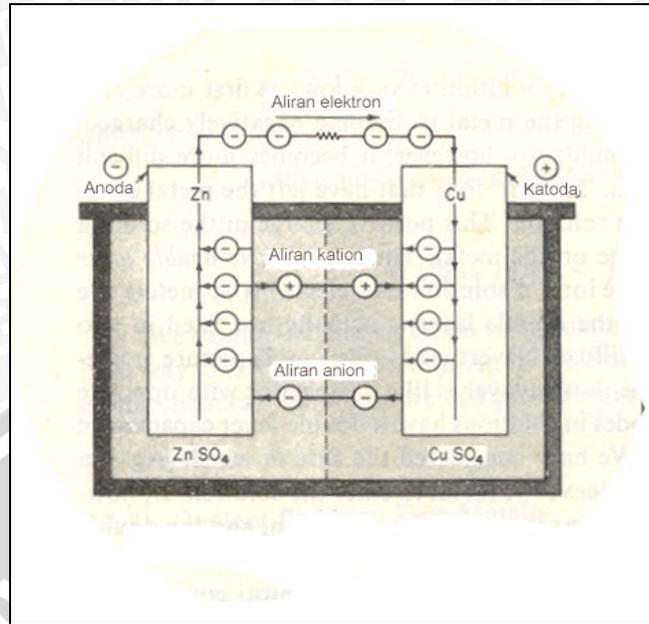
Reaksi oksidasi selalu disertai dengan reaksi reduksi. Oleh karena itu reaksi ini sering disebut sebagai reaksi redoks.

### 2.10.1. Sel Elektrokimia

Sel elektrokimia merupakan suatu alat yang terdiri dari sepasang elektroda yang dicelupkan ke dalam suatu larutan ionik dan dihubungkan dengan konduktor logam pada rangkaian luar. Sel elektrokimia dapat berupa sel galvani atau sel elektrolisis.

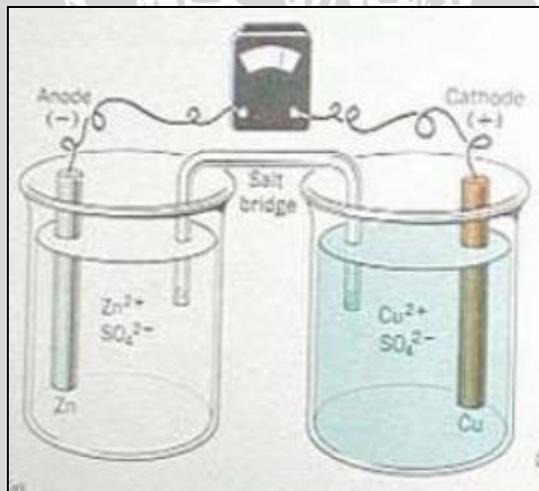
#### 2.10.1.1. Sel Galvani

Sel galvani adalah sel elektrokimia yang dapat menghasilkan energi listrik yang disebabkan oleh terjadinya reaksi redoks yang spontan. Contoh sel galvani adalah sel Daniell yang gambarnya dapat dilihat pada gambar 2.1. Jika kedua elektrodanya dihubungkan dengan sirkuit luar, dihasilkan arus listrik yang dapat dibuktikan dengan menyimpangnya jarum galvanometer yang dipasang pada rangkaian luar dari sel tersebut.



**Gambar 2.1.** Sel Daniell  
Sumber: Huda, 2002: 45

Sel Daniell sering pula dimodifikasi seperti yang terlihat pada gambar 2.2. Kedua setengah sel dihubungkan dengan jembatan garam

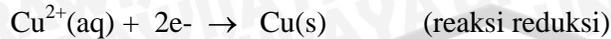


**Gambar 2.2.** Sel Daniell dengan jembatan garam  
Sumber: Huda, 2002: 45

Ketika sel Daniell digunakan sebagai sumber listrik terjadi perubahan dari Zn menjadi Zn<sup>2+</sup> yang larut



Hal ini dapat diketahui dari semakin berkurangnya massa Zn sebelum dan sesudah reaksi. Di sisi lain, elektroda Cu semakin bertambah massanya karena terjadi pengendapan Cu dari  $\text{Cu}^{2+}$  dalam larutan.



Pada sel tersebut elektroda Zn bertindak sebagai anoda dan elektroda Cu sebagai katoda.

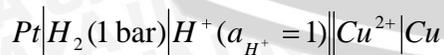
### 2.10.1.2. Sel elektrolisis

Sel elektrolisis adalah sel elektrokimia yang menimbulkan terjadinya reaksi redoks yang tidak spontan dengan adanya energi listrik dari luar. Contohnya adalah elektrolisis lelehan NaCl dengan electrode platina. Contoh lainnya adalah pada sel Daniell jika diterapkan beda potensial listrik dari luar yang besarnya melebihi potensial sel Daniell.

### 2.10.2. Potensial Elektroda

Potensial elektroda tidak dapat diukur. Yang dapat diukur adalah beda potensial dari kedua elektroda (dalam suatu sel). Untuk itu perlu suatu elektroda yang potensialnya diketahui dan hal ini tidak ada. Oleh karena itu dipilih elektroda hidrogen standar sebagai pembanding, dengan perjanjian bahwa elektroda ini mempunyai potensial sama dengan nol.

Untuk mengetahui potensial dari suatu elektroda, maka disusun suatu sel yang terdiri dari elektroda tersebut dipasangkan dengan elektroda hidrogen standar (*Standard Hydrogen Electrode*). Potensial suatu elektroda X didefinisikan sebagai potensial sel yang dibentuk dari elektroda tersebut dengan elektroda hidrogen standar, dengan elektroda X selalu bertindak sebagai katoda. Sebagai contoh potensial elektroda  $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}$  adalah  $E^X$  untuk sel :



$$E_{\text{Sel}} = E_{\text{Ka}} - E_{\text{Ki}}$$

$$E_{\text{Sel}} = E_{\text{Cu}} - E_{\text{H}_2}$$

Karena  $E_{\text{H}_2}$  pada  $P_{\text{H}_2} = 1 \text{ bar}$  dan  $a_{\text{H}^+} = 1$  adalah nol, maka :

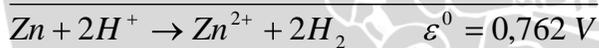
$$E_{Sel} = E_{Cu}$$

Jika  $a_{Cu^{2+}} = 1$  diperoleh  $E_{sel}$  adalah 0,337 V, jadi  $E_{Cu} = 0,337 - E_0$ .

Nilai potensial elektroda bukan nilai mutlak, melainkan relatif terhadap elektroda hidrogen. Karena potensial elektroda dari elektroda X didefinisikan dengan menggunakan sel dengan elektroda X bertindak sebagai katoda (ada di sebelah kanan pada notasi sel), maka potensial elektroda standar dari elektroda X sesuai dengan reaksi reduksi yang terjadi pada elektroda tersebut. Oleh karena itu semua potensial elektroda standar adalah potensial reduksi.

Dari definisi  $E = E_{kanan} - E_{kiri}$ , Kanan dan kiri disini hanya berhubungan dengan notasi sel, tidak berhubungan dengan susunan fisik sel tersebut di laboratorium.

Besaran listrik yang terukur di laboratorium adalah emf (*electric motion force*) dari sel sebagai volta atau sel galvani dengan emf > 0. Sebagai contoh untuk sel yang terdiri dari elektroda seng dan elektroda hidrogen dari pengukuran diketahui bahwa elektron mengalir dari seng melalui rangkaian luar ke elektroda hidrogen dengan emf sel sebesar 0,762 V.



$$E^0 = E_{H^+/H_2}^0 - E_{Zn^{2+}/Zn}^0$$

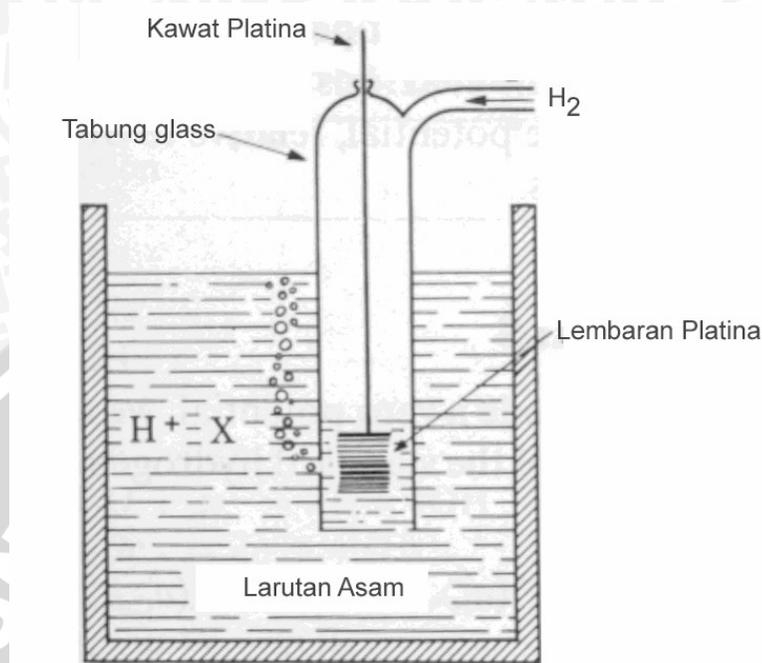
$$0,762 V = 0,00 V - E_{Zn^{2+}/Zn}^0$$

$$E_{Zn^{2+}/Zn}^0 = -0,762 V$$

Jika potensial elektroda berharga positif, artinya elektroda tersebut lebih mudah mengalami reduksi daripada  $H^+$ , dan jika potensial elektroda berharga negatif artinya elektroda tersebut lebih sulit untuk mengalami reduksi dibandingkan dengan  $H^+$ .

Potensial elektroda seringkali disebut sebagai potensial elektroda tunggal, sebenarnya kata ini tidak tepat karena kita tahu bahwa elektroda tunggal tidak dapat diukur.

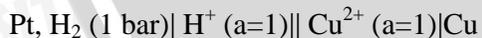
### 2.10.3. Elektroda Hidrogen Standar Sebagai Elektroda Pemanding



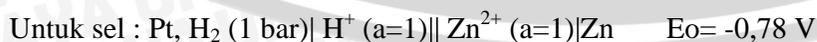
**Gambar 2.3** Pengukuran potensial elektroda standar  
Sumber: Huda, 2002: 30

Menurut perjanjian, emf dari elektroda hidrogen standar adalah nol. Pada gambar 2.3, elektroda hidrogen berada pada keadaan standar jika fugasitas gasnya adalah 1 dan aktifitas ion  $H^+$  adalah 1. IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) menempatkan elektroda hidrogen pada sisi kiri, dan emf dari elektroda lainnya diambil sebagai emf sel tersebut. Hanya emf yang demikian, pada kondisi standar disebut sebagai potensial elektroda standar atau potensial reduksi standar.

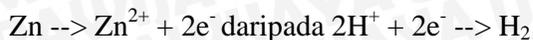
Contoh :



Sel tersebut memberikan  $E_{O_{\text{Sel}}} = + 0,34 \text{ Volt}$ . Karena  $E_{O_{\text{Hidrogen}}} = 0 \text{ Volt}$ , maka ini menunjukkan tendensi yang lebih besar untuk proses :

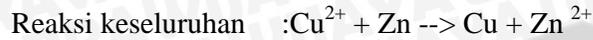
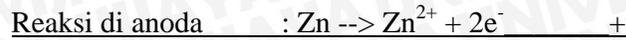


Artinya pada sel tersebut, ada tendensi yang lebih besar untuk proses :



Kedua reaksi dapat digabung emf nya:





Besar emf adalah :

$$\begin{aligned} E_{\text{sel}} &= E_{\text{katoda}} - E_{\text{anoda}} \\ &= 0,34 \text{ V} - (-0,76 \text{ V}) \\ &= 1,1 \text{ V} \end{aligned}$$

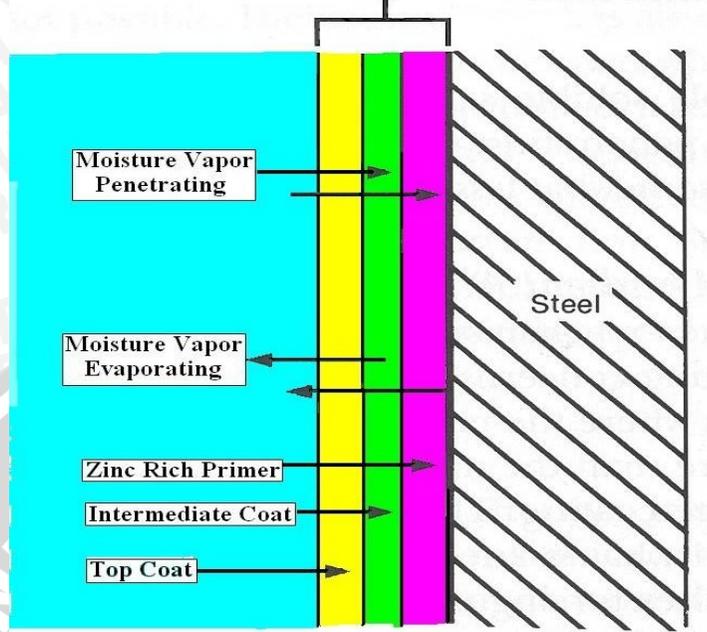
#### 2.10.4. Elektroda pembanding selain hidrogen

Pada dasarnya semua elektroda reversibel dapat digunakan sebagai elektroda rujukan untuk pembanding, tapi berdasarkan kepraktisannya elektroda pembanding yang paling banyak digunakan adalah elektroda perak-perak klorida ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ) dan kalomel ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ).

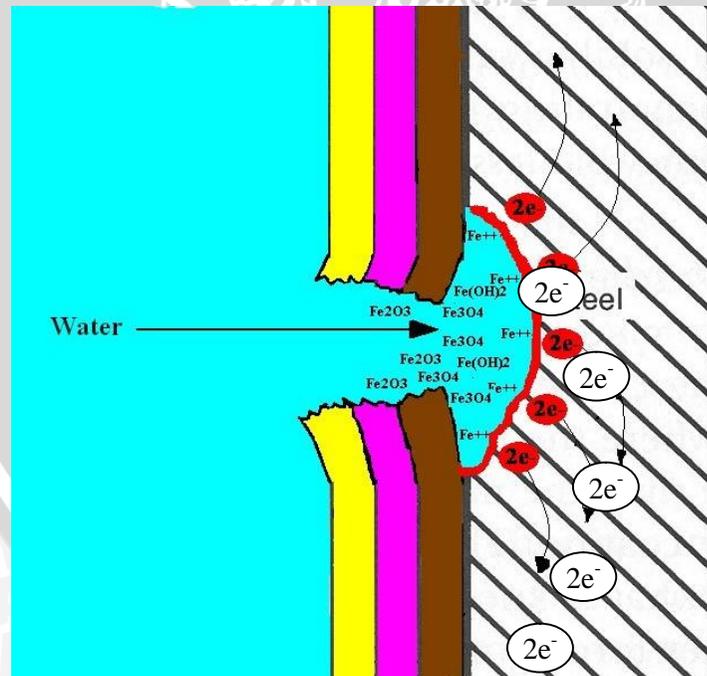
#### 2.11. Proteksi Katodik

Cara pemberian arus searah dalam system proteksi katodik ada dua yaitu dengan cara anoda tumbal atau dengan cara yang dikenal dengan sebutan arus tanding.. Secara teknis tujuan keduanya adalah agar logam yang diproteksi mempunyai potensial listrik yang lebih rendah terhadap lingkungan yang korosif sehingga kemungkinan terjadinya oksidasi dapat diminimalkan seperti terlihat pada gambar 2.4 , 2.5 dan 2.6.

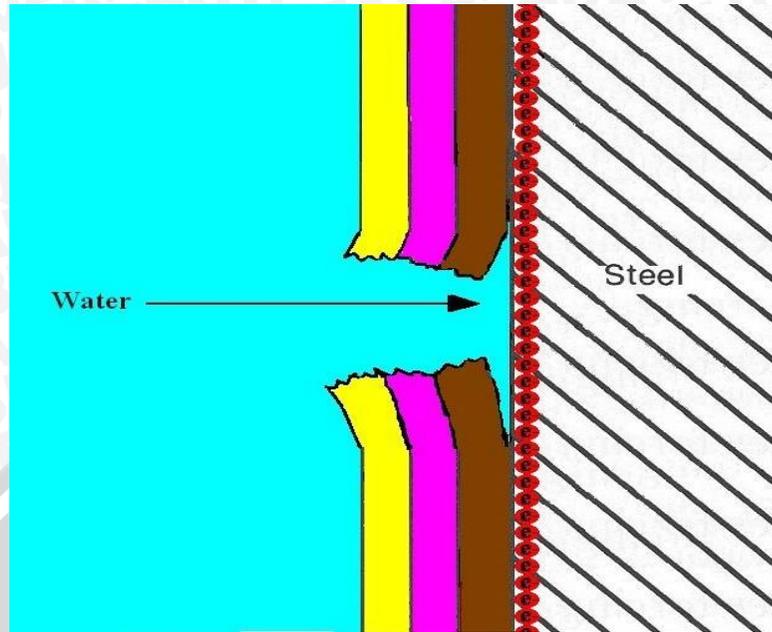
3 Coat Coating System  
Strong Adhesion



**Gambar 2.4** Logam yang dilengkapi 3 pelapis (Northern Arizona Wind & Sun, Inc, 2006)



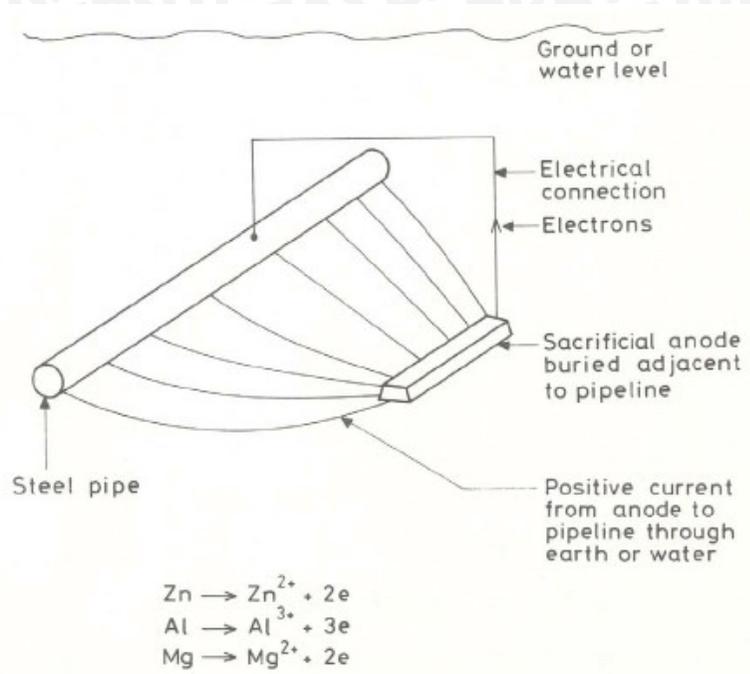
**Gambar 2.5** Ilustrasi proses terjadinya korosi akibat rusaknya logam pelapis (Northern Arizona Wind & Sun, Inc, 2006)



**Gambar 2.6** Ilustrasi proses proteksi katodik dalam mencegah terjadinya korosi akibat rusaknya logam pelapis (Northern Arizona Wind & Sun, Inc, 2006)

### 2.11.1. *Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)*

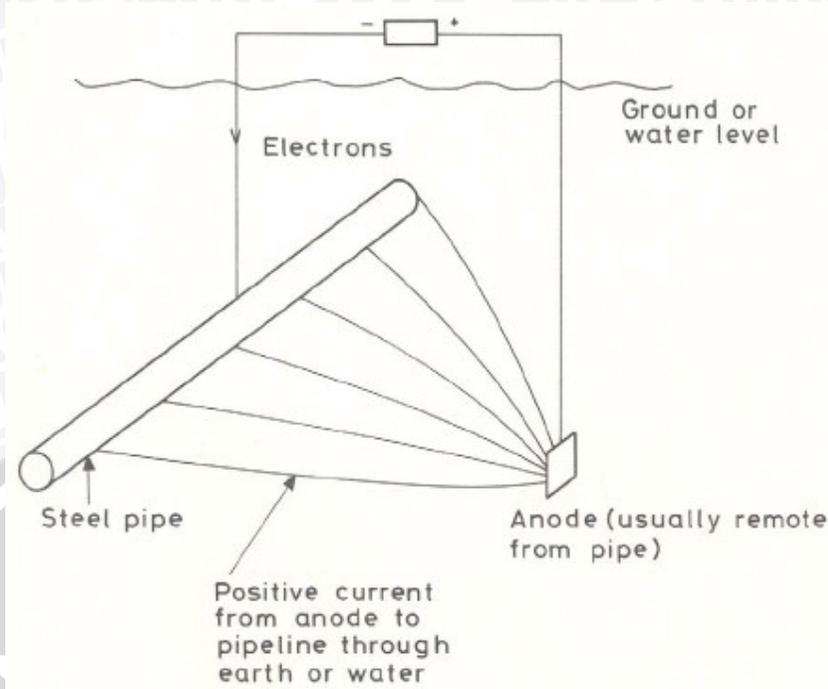
SACP umumnya dikenal dengan sistem proteksi katodik anoda korban. Pada sistem proteksi katodik ini, tidak diperlukan suplai daya (gambar 2. 7). Paduan yang dijadikan anoda korban akan membangkitkan arus yang diperlukan sebagai akibat adanya perbedaan potensial dengan struktur yang dilindunginya. Adanya pembangkitan arus dari anoda korban mengakibatkan umur anoda korban terbatas. Jenis logam yang umum digunakan sebagai anoda korban antara lain: Magnesium, seng atau aluminium pada berbagai derajat kemurnian atau paduan dengan komposisi khusus.



**Gambar 2.7** Proteksi Katodik galvanik  
(Northern Arizona Wind & Sun, Inc, 2006)

### 2.11.2. *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)*

ICCP umumnya dikenal dengan sistem proteksi katodik arus tanding, Sistem proteksi katodik ini memanfaatkan arus searah yang disuplai dari suatu sumber daya, dengan kutub positif dari sumber daya dihubungkan dengan anoda sedangkan kutub negatifnya dihubungkan dengan sistem yang akan diproteksi (gambar 2.8). Pemberian arus listrik eksternal ini bertujuan untuk menandingi arus galvanis dari katoda agar katoda mempunyai potensial listrik lebih negatif dibanding lingkungannya. Anoda yang digunakan umumnya terbuat dari bahan yang inert atau memiliki umur yang relatif panjang seperti misalnya besi cor berkadar silicon yang tinggi, grafit atau aluminum. Sumber daya yang digunakan tergantung pada mudah tidaknya jaringan listrik diperoleh. Untuk mengkonversikan arus AC menjadi DC digunakan *Rectifiers*. Jika tidak memungkinkan dapat digunakan baterai atau energi matahari sebagai sumber penyuplai arus searah.



**Gambar 2.8** *Impressed Current*  
(Northern Arizona Wind & Sun, Inc, 2006)

### 2.11.3. Perbandingan SACP dan ICCP

Masing-masing sistem memiliki kelemahan dan kelebihan. Pada table 2.1 disebutkan kelemahan dan kelebihan tersebut sebagai berikut:

**Tabel 2.1** Kelemahan dan kelebihan sistem proteksi katodik  
(Suratman Rochim, 2005)

Anoda Korban	Arus Tanding
Tidak memerlukan sumber daya dari luar	Memerlukan sumber daya
Output arus listrik terbatas	Arus dapat divariasikan
Terbatas hanya untuk tahanan rendah	Tidak masalah untuk medium yang bertahanan tinggi
Memerlukan elektrolit	Memerlukan elektrolit
Biaya instalasi relative rendah	Biaya instalasi relative tinggi
Persoalan interferensi relative rendah	Dapat menimbulkan masalah interferensi
Lingkup proteksi terbatas	Dapat memproteksi struktur yang lebih luas.

#### 2.11.4. Pengujian Proteksi Katodik

Pengujian proteksi katodik berbeda antara SACP dan ICCP. Pengujian untuk SACP dilakukan melalui pengukuran arus listrik yang mengalir dari anoda menuju titik lemah dari logam, sedangkan pada ICCP dilakukan melalui pengukuran beda potensial listrik logam tersebut terhadap suatu referensi standar yang ditempatkan pada medan listrik yang ditimbulkan antara anoda dan katoda. Semakin negatif beda potensial suatu logam yang diproteksi terhadap referensi menandakan tingkat proteksinya semakin baik..

#### 2.6 Hipotesa

Semakin pendek jarak dan semakin kecil perbandingan luasan (K/A), maka rapat arus listrik semakin besar sehingga katoda akan mempunyai potensial negatif yang lebih tinggi sehingga kecenderungan terjadinya oksidasi semakin kecil yang artinya laju korosinya lebih rendah atau bahkan tidak terjadi.



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.8 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental (*experimental research*). Metode ini digunakan untuk menguji pengaruh dari suatu perlakuan terhadap suatu proses. Pengaruh dari beberapa perlakuan yang berbeda terhadap suatu proses dibandingkan sehingga diperoleh suatu pola kejadian yang saling berhubungan.

#### 3.9 Variabel Yang Diteliti

##### 3.9.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh penelitian dan ditentukan sebelum penelitian. Besar variabel bebas divariasikan untuk mendapatkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat sehingga tujuan penelitian dapat tercapai. Dalam penelitian ini terdapat dua variabel bebas yang digunakan yaitu jarak antar elektroda, yakni sebesar 10cm, 20cm, 30cm, 40cm dan 50cm dan perbandingan luas katoda dibanding anoda (K/A) yakni sebesar 0,33, 0,5, 1, 2 dan 3.

##### 3.9.2 Variabel Kontrol

Adalah variabel yang dijaga konstan selama penelitian, kontrol pada penelitian ini adalah:

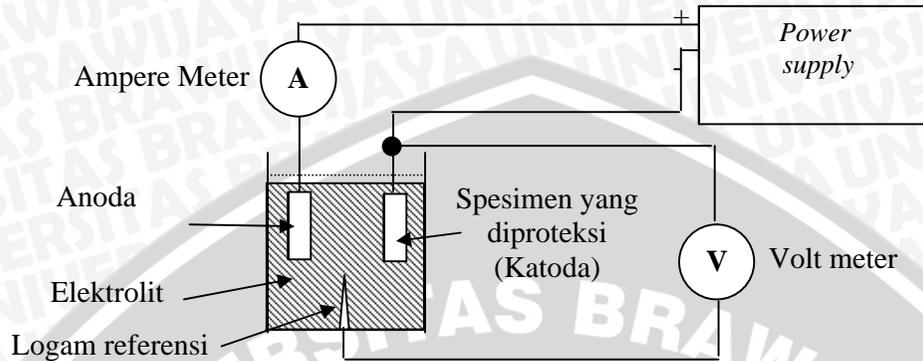
1. Konsentrasi natrium klorida (NaCl) yang digunakan dalam pengujian korosi yakni sebesar 5%
2. Beda Potensial listrik yakni sebesar 18 V
3. Temperatur elektrolit  $27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
4. Waktu pengujian 2 jam

##### 3.9.3 Variabel Terikat

Adalah variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan sebelum penelitian, tetapi besarnya tergantung dari variabel bebas. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah tingkat proteksi pada sistem proteksi katodik yang diindikasikan dari potensial negatif dari katodanya.

### 3.10 Skema Alat Penelitian

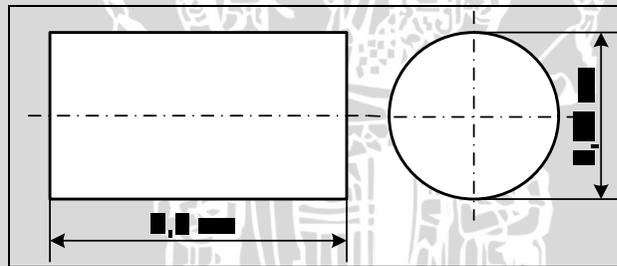
Skema alat penelitian yang digunakan dalam penelitian sesuai dengan gambar 3.1 berikut:



**Gambar 3.1** Skema alat penelitian

### 3.11 Benda Kerja

Spesimen yang diproteksi terbuat dari baja ST-37 berbentuk silinder pejal dengan diameter 2,54 cm dan panjang 2,8 cm. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini.



**Gambar 3.2** Benda kerja  
(Sumber: Rancangan Penelitian)

Anoda terbuat dari batang karbon dengan dimensi disesuaikan dengan variasi perbandingan luas katoda terhadap anoda. Logam referensi terbuat dari jarum baja yang dilapisi dengan perak.

Berikut tabel luasan benda kerja

$$\text{Luasan Lingkaran} = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

$$\text{Keliling} = \pi \cdot D$$

$$\text{Luas Selimut} = \text{keliling} \times \text{panjang}$$

$$\text{Luas keseluruhan} = 2 \times \text{luas lingkaran} + \text{luas selimut}$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot \frac{(2,54\text{cm})^2}{4} + \pi \cdot 2,54\text{cm} \cdot 2,8\text{cm}$$

$$= 32,47 \text{ cm}^2$$

Dengan menggunakan diameter yang sama yakni 2,54 cm, Luasan untuk semua spesimen ditabelkan dalam tabel 3.1 berikut:

**Tabel 3.1** Luasan Benda kerja

Perbandingan luasan (K/A)	Anoda		Katoda	
	Panjang (cm)	Luasan (cm <sup>2</sup> )	Panjang (cm)	Luasan (cm <sup>2</sup> )
3	0,93	17,58	2,8	32,47
2	1,4	21,31	2,8	32,47
1	2,8	32,48	2,8	32,47
0,5	5,6	54,82	2,8	32,47
0,33	8,4	77,16	2,8	32,47

### 3.12 Alat penelitian

#### 1. Power supply

*Power supply* adalah suatu peralatan yang berfungsi menurunkan tegangan listrik serta pengubah arus listrik AC menjadi DC. Power supply yang digunakan dalam penelitian ini dapat merubah listrik 220 Volt AC menjadi listrik maksimum 40 V DC, dengan arus listrik maksimum 5A dan daya maksimum yang dapat dikeluarkan sebesar 200 Watt.

#### 2. AVO meter

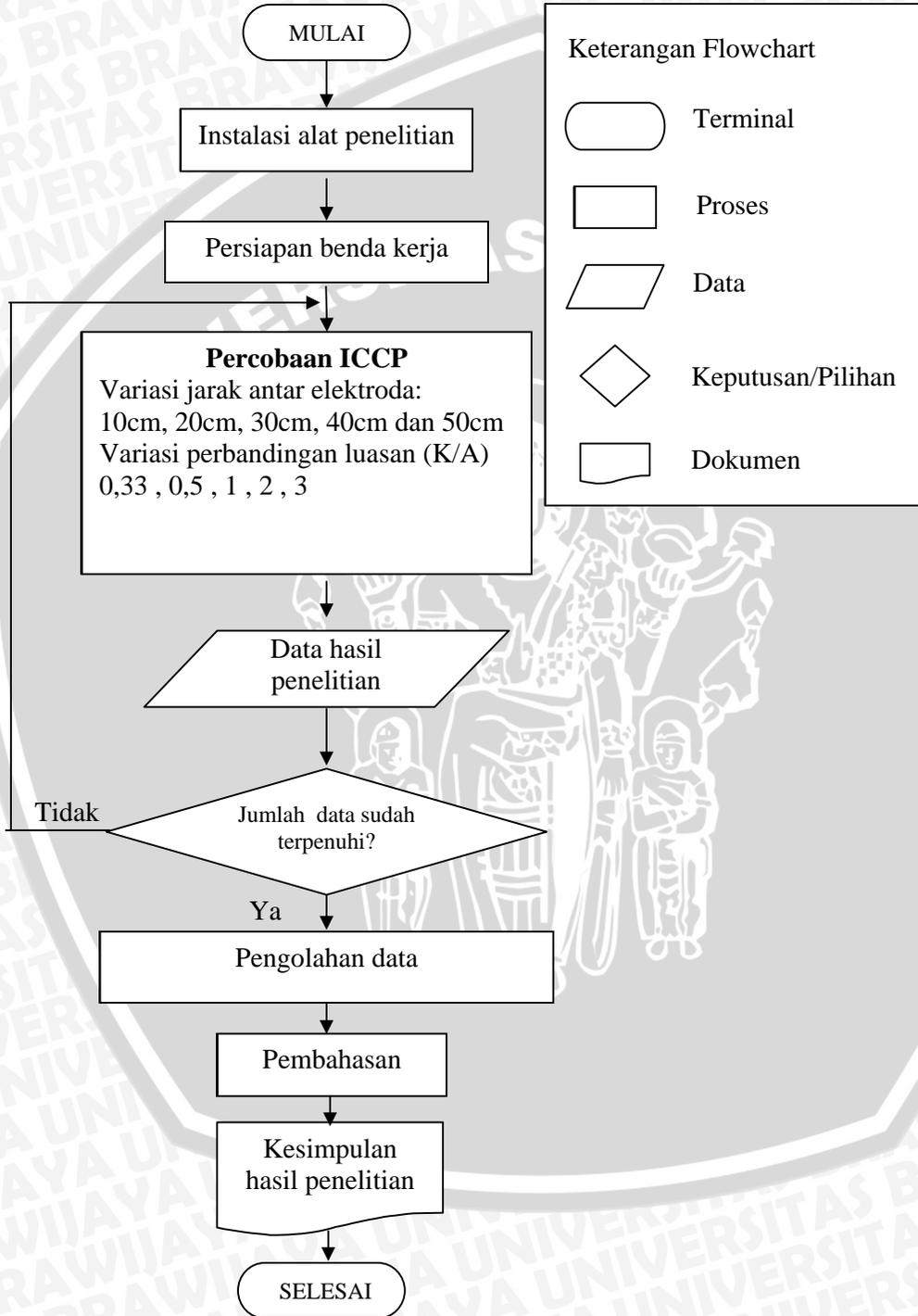
AVO meter digunakan untuk mengukur beda potensial listrik, arus listrik dan hambatan listrik.

#### 3. Bak untuk proses elektrokimia

Bak proses yang digunakan berbentuk kotak dengan dimensi alas 30cm x 55cm dan tinggi 20cm

### 3.13 Prosedur penelitian

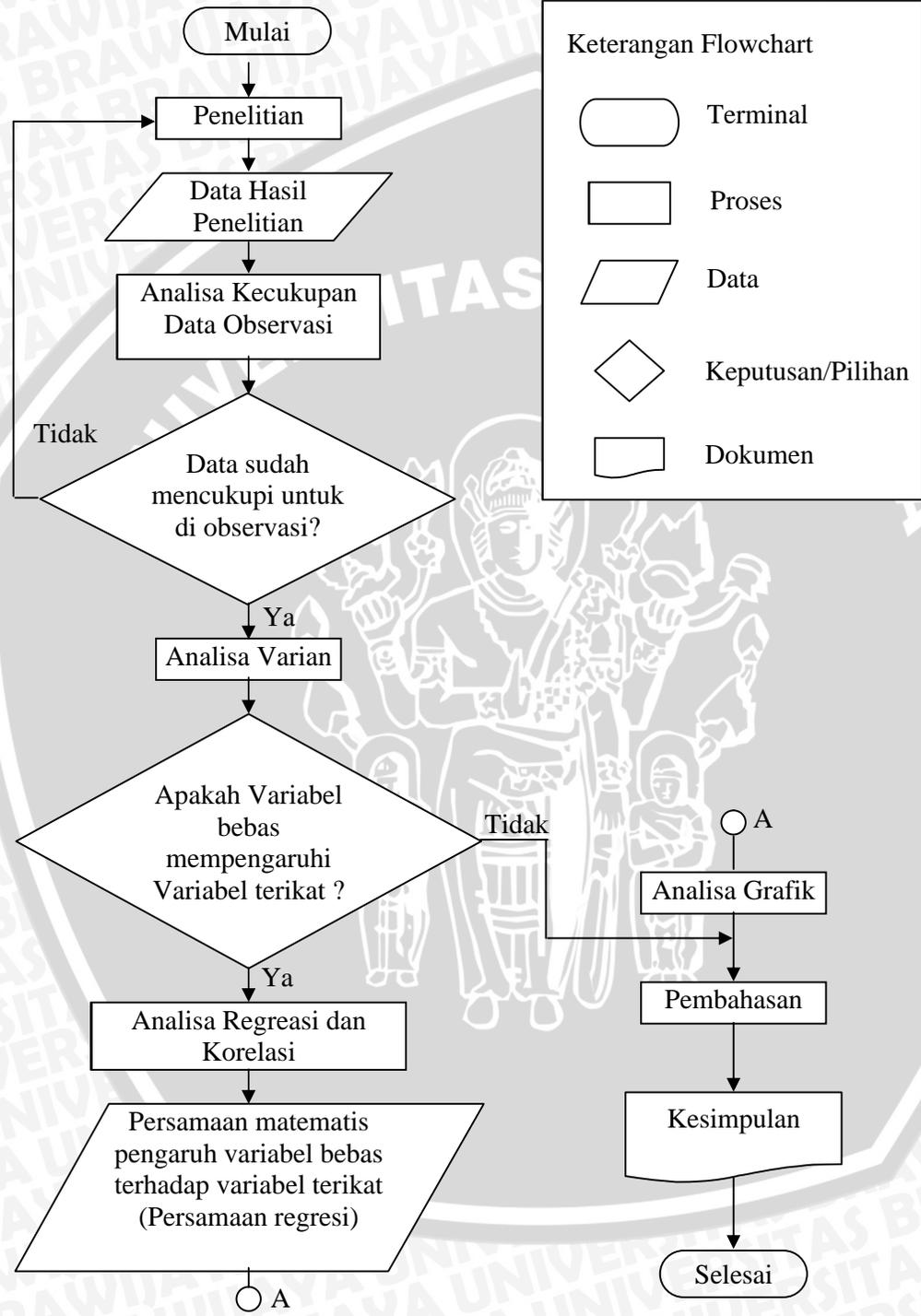
Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini sesuai dengan diagram alir pada gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3. Diagram alir penelitian

### 3.14 Rancangan Pengolahan data Penelitian

Rancangan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.4 Diagram Alur Pengolahan data penelitian

### 3.14.1 Uji Kecukupan Data Observasi

Data hasil penelitian ditabelkan dalam tabel berikut berikut:

**Tabel 3.1** Format Tabel Uji Kecukupan Data Observasi

No sampel $n_i$	Data observasi $x_i$	$x_i^2$	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	$x_1$	$x_1^2$	$x_1 - \bar{x}$	$(x_1 - \bar{x})^2$
2	$x_2$	$x_2^2$	$x_2 - \bar{x}$	$(x_2 - \bar{x})^2$
3	$x_3$	$x_3^2$	$x_3 - \bar{x}$	$(x_3 - \bar{x})^2$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
n	$x_n$	$x_n^2$	$x_n - \bar{x}$	$(x_n - \bar{x})^2$
TOTAL ( $\sum_{i=1}^n n_i$ )	$\sum x_i$	$\sum x_i^2$	$\sum (x_i - \bar{x})$	$\sum (x_i - \bar{x})^2$

1. Mean (rata-rata) sampel

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

2. Variasi sampel ( $\sigma^2$ )

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

3. Standart deviasi (sampel)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

4. Tingkat ketelitian (*degree of accuracy*) DA:

$$DA = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

5. Tingkat keyakinan (confidence level) CL:

$$CL = 100\% - DA$$

6. Tingkat ketelitian (S) =  $\frac{DA}{100}$

7. Kecukupan data observasi (N')

$$N' = \left[ \frac{\frac{k}{s} \sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}}{\sum_{i=1}^n x_i} \right]^2$$

Bila  $n > N'$  maka data sudah mencukupi untuk analisa

### 3.14.2 Analisis Varian

Dari analisis varian dua arah ini akan diketahui ada tidaknya pengaruh dari jarak antar elektroda (faktor A) dan perbandingan luas katoda dibanding anoda (faktor B) serta pengaruh interaksi antara keduanya (faktor AB) terhadap tingkat proteksi ICCP.

Faktor A dan B masing-masing mempunyai level  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_r$  dan  $B_1, B_2, B_3, \dots, B_c$ . Jika jumlah pengamatan (pengulangan) adalah  $t$  kali, dari rancangan dua kategori A dan B dengan masing-masing kategori terdiri atas  $a$  dan  $b$  level, sedangkan pengaruh interaksi antara faktor A dan B dinyatakan dengan  $(\alpha\beta)_{ij}$  dengan  $\alpha_i$  merupakan pengaruh faktor A pada level ke  $i$  dan  $\beta_j$  merupakan faktor B pada level ke  $j$ , maka nilai pengamatan dapat ditulis dalam model matematis sebagai berikut:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

dengan  $\mu$  = nilai rata-rata dari seluruh pengamatan

$\alpha_i$  = pengaruh faktor A ke  $i$

$\beta_j$  = pengaruh faktor B ke  $j$

$(\alpha\beta)_{ij}$  = pengaruh interaksi faktor A ke  $i$  dan B ke  $j$

$\varepsilon_{ijk}$  = simpangan pengamatan  $Y_{ijk}$

Untuk hipotesis dalam penelitian ini dapat ditulis sebagai berikut:

$H_0$  Variabel bebas : Variasi variabel bebas tidak mempengaruhi perubahan variabel terikat

$H_1$  Variabel bebas : Variasi variabel bebas mempengaruhi perubahan variabel terikat

Tabel 3.2. Rancangan Hasil pengujian uji proteksi katodik dengan lebih dari satu kali pengamatan

Faktor	B						$\Sigma$ baris	Rata-rata
	level	B <sub>1</sub>	...	B <sub>j</sub>	...	B <sub>c</sub>		
A	A <sub>1</sub>	Y <sub>111</sub> Y <sub>112</sub> ... Y <sub>11t</sub>		Y <sub>1j1</sub> Y <sub>1j2</sub> ... Y <sub>1jt</sub>		Y <sub>1c1</sub> Y <sub>1c2</sub> ... Y <sub>1ct</sub>	T <sub>1..</sub>	Y <sub>1..</sub>
	A <sub>i</sub>	Y <sub>i11</sub> Y <sub>i12</sub> ... Y <sub>i1t</sub>		Y <sub>ij1</sub> Y <sub>ij2</sub> ... Y <sub>ijt</sub>		Y <sub>ic1</sub> Y <sub>ic2</sub> ... Y <sub>ict</sub>	T <sub>i..</sub>	Y <sub>i..</sub>
	A <sub>r</sub>	Y <sub>r11</sub> Y <sub>r12</sub> ... Y <sub>r1t</sub>		Y <sub>rj1</sub> Y <sub>rj2</sub> ... Y <sub>rjt</sub>		Y <sub>rc1</sub> Y <sub>rc2</sub> ... Y <sub>rc t</sub>	T <sub>r..</sub>	Y <sub>r..</sub>
$\Sigma$ kolom		T <sub>.1.</sub>		T <sub>.j.</sub>		T <sub>.c.</sub>	T	
Rata-rata		Y <sub>.1.</sub>		Y <sub>.j.</sub>		Y <sub>.c.</sub>		Y

Pengolahan data statistik dilakukan dua kali yakni menggunakan bantuan program *Microsoft Excel* dan dengan perhitungan manual. Dengan menggunakan perhitungan statistik diperoleh data sebagai berikut:

1. Jumlah seluruh perlakuan :

$$\sum_{i=1}^r \cdot \sum_{j=1}^c \cdot \sum_{k=1}^t Y_{ijk} \tag{3-1}$$

2. Jumlah kuadrat seluruh perlakuan :

$$\sum_{i=1}^r \cdot \sum_{j=1}^c \cdot \sum_{k=1}^t Y_{ijk}^2 \quad (3-2)$$

3. Faktor koreksi (FK) :

$$FK = \frac{\left[ \sum_{i=1}^r \cdot \sum_{j=1}^c \cdot \sum_{k=1}^t Y_{ijk} \right]^2}{rct} \quad (3-3)$$

4. Jumlah kuadrat total (JKT) :

$$JKT = \sum_{i=1}^r \cdot \sum_{j=1}^c \cdot \sum_{k=1}^t Y_{ijk}^2 - FK \quad (3-4)$$

5. Jumlah kuadrat perlakuan (JKP) :

$$JKP = \frac{\sum_{i=1}^r \cdot \sum_{j=1}^c T_{ij}^2}{t} - FK \quad (3-5)$$

6. Jumlah kuadrat pengaruh jarak antar elektroda (JKA) :

$$JKA = \frac{\sum_{i=1}^r T_i^2}{ct} - FK \quad (3-6)$$

7. Jumlah kuadrat pengaruh perbandingan luas katoda anoda (JKB) :

$$JKB = \frac{\sum_{j=1}^c T_j^2}{rt} - FK \quad (3-7)$$

8. Jumlah kuadrat pengaruh interaksi jarak antar elektroda dan perbandingan luas katoda dibanding anoda (JKAB) :

$$JKAB = JKP - JKA - JKB \quad (3-8)$$

9. Jumlah kuadrat galat (JKG) :

$$JKG = JKT - JKA - JKB - JKAB \quad (3-9)$$

10. Nilai varian dari masing-masing perlakuan sebagai berikut :

$$1. S_A^2 = \frac{JKA}{r-1} \quad (3-10)$$

$$2. S_B^2 = \frac{JKB}{c-1} \quad (3-11)$$

$$3. S_{AB}^2 = \frac{JKAB}{(r-1)(c-1)} \quad (3-12)$$

$$4. S^2 = \frac{JKG}{rc(t-1)} \quad (3-13)$$

11. Nilai  $F_{hitung}$  dari masing-masing sumber keragaman sebagai berikut :

5. Untuk faktor jarak antar elektroda:

$$F_{Ahitung} = \frac{S_A^2}{S^2} \quad (3-14)$$

6. Untuk faktor perbandingan luas katoda dibanding anoda :

$$F_{Bhitung} = \frac{S_B^2}{S^2} \quad (3-15)$$

7. Untuk faktor jarak antar elektroda dan perbandingan luas katoda dibanding anoda :

$$F_{AB\ hitung} = \frac{S_{AB}^2}{S^2} \quad (3-16)$$

Tabel 3.3. Tabel Rancangan Analisis Varian Dua Arah

Sumber Keragaman	Db	JK	Varian(KT)	F <sub>hitung</sub>	F <sub>tabel</sub>
Pengaruh A	r - 1	JKA	$S_A^2$	$F_{Ahitung}$	$F_{Atabel}$
Pengaruh B	c - 1	JKB	$S_B^2$	$F_{Bhitung}$	$F_{Btabel}$
Interaksi A dan B	(r - 1) (c-1)	JKAB	$S_{AB}^2$	$F_{ABhitung}$	$F_{ABtabel}$
Galat	r.c (t -1)	JKG	$S^2$		
Total	rct	JKT			

Keterangan:

A = Jarak antar elektroda

B = Perbandingan luasan (K/A)

Hasil perhitungan yang ditunjukkan pada tabel 3.2 dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1.  $F_{A\ hitung} > F_{A\ tabel}$ , maka  $H_0^A$  ditolak dan  $H_1^A$  diterima, Hal ini menunjukkan bahwa ada perbedaan yang nyata dari jarak antar elektroda terhadap tingkat proteksi ICCP dengan tingkat keyakinan 95% .

2.  $F_B \text{ hitung} > F_B \text{ tabel}$ , maka  $H_0^B$  ditolak dan  $H_1^B$  diterima, Hal ini menunjukkan bahwa ada perbedaan yang nyata perlakuan variasi perbandingan luas (K/A) terhadap tingkat proteksi ICCP dengan tingkat keyakinan 95%.
3.  $F_{AB} \text{ hitung} > F_{AB} \text{ tabel}$ , maka  $H_0^{AB}$  ditolak dan  $H_1^{AB}$  diterima, Hal ini menunjukkan bahwa ada perbedaan yang nyata pada perlakuan interaksi dari jarak antar elektroda dan perbandingan luas (K/A) terhadap tingkat proteksi ICCP dengan tingkat keyakinan 95% .

### 3.14.3 Analisis Regresi

Untuk mencari hubungan dan seberapa besar pengaruh variabel bebas terhadap perubahan variabel terikat digunakan analisa regresi sehingga dapat diketahui persamaan regresinya.

Persamaan regresi yang dipakai adalah model polinomial di mana dinyatakan dengan persamaan umum sebagai berikut :

$$Y = a + bX + cX^2 \quad (3-17)$$

Dengan: Y = Variabel terikat

X = Variabel bebas

Untuk memperoleh koefisien regresi dilakukan menurut perhitungan sebagai berikut:

$$\Sigma Y = aN + b\Sigma X + c\Sigma X^2 \quad (3-18)$$

$$\Sigma XY = a\Sigma X + b\Sigma X^2 + c\Sigma X^3 \quad (3-19)$$

$$\Sigma X^2 Y = a\Sigma X^2 + b\Sigma X^3 + c\Sigma X^4 \quad (3-20)$$

Koefisien korelasi dinyatakan sebagai variasi dari persamaan dibandingkan variasi dari data yang didapatkan

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(Y - y)^2}{\Sigma(Y - Yi)^2} \quad (3-21)$$

### 3.14.4 Analisis Grafik

Analisa grafik dilakukan dengan menggunakan bantuan program *Microsoft Excel*, Analisa grafik dilakukan melalui pengamatan perubahan *trend* data pada grafik yang diperoleh dari *ploting* data.

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.4 Data Penelitian Hasil Pengujian Efektivitas Proteksi Sistem ICCP.

Dari hasil percobaan ICCP dengan pengulangan percobaan sebanyak 5 kali tiap variasi, didapatkan data hasil penelitian sesuai tabel 4.1 berikut:

**Tabel 4.1.** Data potensial ( mV vs Ag )

Variabel		Jarak (cm)				
		10	15	20	25	30
Perbandingan luasan katoda terhadap anoda ( K/A )	0,33	-475	-450	-418	-410	-398
		-460	-440	-392	-380	-377
		-466	-436	-420	-409	-392
		-454	-452	-414	-406	-387
		-473	-455	-414	-404	-378
	0,5	-496	-476	-453	-441	-429
		-478	-465	-432	-413	-394
		-481	-460	-419	-414	-398
		-486	-467	-440	-423	-393
		-490	-472	-431	-412	-391
	1	-476	-456	-425	-412	-387
		-454	-439	-404	-367	-357
		-461	-436	-399	-392	-371
		-448	-446	-413	-397	-381
		-469	-441	-400	-391	-365
	2	-422	-415	-386	-369	-356
		-413	-393	-364	-349	-325
		-414	-400	-381	-367	-343
		-411	-400	-360	-351	-342
		-429	-405	-384	-376	-356
3	-427	-410	-378	-364	-355	
	-399	-386	-344	-324	-308	
	-400	-382	-360	-336	-308	
	-409	-399	-371	-363	-338	
	-406	-404	-381	-362	-344	

Berat baja sebelum dilakukan uji efektivitas proteksi sistem ICCP dan sesudah dilakukan pengujian selama 2 jam tidak mengalami perubahan yakni sekitar 80 gram.

#### 4.5 Analisis statistik

##### 4.5.1 Uji Kecukupan Data Observasi

Uji kecukupan data observasi dilakukan untuk verifikasi kecukupan data penelitian yang diperoleh dari percobaan yang dilakukan yakni sebanyak 5 kali. Jika data minimum ( $N' \leq 5$ ) maka data hasil penelitian dinilai cukup dan tidak diperlukan pengumpulan data tambahan. Untuk mempermudah analisis data maka data hasil percobaan pengujian efektivitas proteksi sistem ICCP pada variasi jarak 10 cm dan perbandingan luasan (K/A) 0,33 ditabelkan seperti pada tabel 4.2

**Tabel 4.2** Data hasil pengujian efektivitas proteksi ICCP pada variasi jarak 10 cm dan perbandingan luasan 0,33

No sampel $n_i$	Data Observasi $x_i$	$x_i^2$	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	-475	225694	-10	91
2	-460	212014	5	26
3	-466	216796	0	0
4	-454	205820	12	141
5	-473	223606	-7	54
Total	-2328	1083930	0	311

##### 1. Mean (rata-rata) sampel

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} = \frac{-2328}{5} = -465,53$$

##### 2. Variasi sampel ( $\sigma^2$ )

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} = \frac{311}{5 - 1} = 77,82$$

**3. Standart deviasi (sampel)**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{311}{5-1}} = 8,82$$

**4. Tingkat ketelitian (degree of accuracy) DA:**

$$DA = \left| \frac{\sigma}{\bar{x}} \right| \cdot 100\%$$

$$DA = \left| \frac{8,82}{465,53} \right| \cdot 100\%$$

$$DA = 1,89 \%$$

**5. Tingkat keyakinan (confidence level) CL:**

$$CL = 100 \% - DA$$

$$CL = 100\% - 1,89 \%$$

$$CL = 98,10 \%$$

**6. Tingkat ketelitian (S)**

$$S = \frac{DA}{100} = \frac{1,89}{100} = 0,0189$$

**7. Kecukupan data observasi (N')**

$$N' = \left[ \frac{\frac{2}{0,0189} \sqrt{5 \times 1083930 - (311)^2}}{311} \right]^2$$

$$N' = 3,2 \approx 4$$

Berikut tabel hasil uji kecukupan data observasi data hasil penelitian

**Tabel 4.3.** Uji kecukupan data observasi

Kecukupan Data Observasi		Jarak (cm)				
		10	15	20	25	30
Perbandingan Luasan (K/A)	0,33	CL = 98,1% N' = 4	CL = 98,1% N' = 4	CL = 97,2% N' = 4	CL = 96,9% N' = 4	CL = 97,6% N' = 4
	0,5	CL = 98,5% N' = 4	CL = 98,6% N' = 4	CL = 97,1% N' = 4	CL = 97,1% N' = 4	CL = 96,0% N' = 4
	1	CL = 97,5% N' = 4	CL = 98,2% N' = 4	CL = 97,3% N' = 4	CL = 95,8% N' = 4	CL = 96,7% N' = 4
	2	CL = 98,1% N' = 4	CL = 97,9% N' = 4	CL = 96,7% N' = 4	CL = 96,6% N' = 4	CL = 96,2% N' = 4
	3	CL = 97,2% N' = 4	CL = 97,0% N' = 4	CL = 95,9% N' = 4	CL = 94,6% N' = 4	CL = 93,4% N' = 4

**4.5.2 Analisis Varian**

Analisis varian dilakukan menggunakan analisis varian dua arah, karena terdapat dua variabel bebas yakni variasi jarak dan variasi perbandingan luasan (K/A). Perhitungan analisis dilakukan dua kali yakni dengan menggunakan perhitungan manual dan menggunakan dengan bantuan program *Microsoft Excel* untuk verifikasi terhadap perhitungan data manual.

Berikut perhitungan deskripsi statistik untuk analisis varian dua arah:

- a. Jumlah seluruh perlakuan :

$$\sum_{i=1}^r \cdot \sum_{j=1}^c \cdot \sum_{k=1}^t Y_{ijk} = -50.771,78$$

- b. Jumlah kuadrat seluruh perlakuan :

$$\sum_{i=1}^r \cdot \sum_{j=1}^c \cdot \sum_{k=1}^t Y_{ijk}^2 = 20.837.762,68$$

c. Faktor koreksi (FK) :

$$FK = \frac{\left[ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t Y_{ijk} \right]^2}{rct} = 2.062.2190,20$$

d. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$JKT = \left[ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t Y_{ijk} \right]^2 - FK = 215.572,48$$

e. Jumlah Kuadrat Perlakuan (JKP)

$$JKP = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=k}^c Y_{ij}^2}{t} - FK = 200.593,02$$

f. Jumlah kuadrat pengaruh jarak (JKA)

$$JKA = \frac{\sum_{i=1}^r T_i^2}{ct} - FK = 89.883,36$$

g. Jumlah kuadrat pengaruh perbandingan luasan (JKB)

$$JKB = \frac{\sum_{j=1}^c T_j^2}{rt} - FK = 109.894,58$$

h. Jumlah kuadrat pengaruh interaksi jarak dan perbandingan luasan ( JKAB )

$$JKAB = JKP - JKA - JKB = 815,08$$

i. Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$\begin{aligned} JKG &= JKT - JKA - JKB - JKAB \\ &= 14.979,45 \end{aligned}$$

j. Nilai varian dari masing-masing perlakuan sebagai berikut :

$$1. S_A^2 = \frac{JKA}{r-1} = 22.470,83$$

$$2. S_B^2 = \frac{JKB}{c-1} = 27.473,64$$

$$3. S_{AB}^2 = \frac{JKAB}{(r-1)(c-1)} = 50,94$$

$$4. S^2 = \frac{JKG}{rc(t-1)} = 149,79$$

k. Nilai  $F_{hitung}$  dari masing-masing sumber keragaman sebagai berikut :

1. Untuk faktor jarak :

$$F_{Ahitung} = \frac{S_A^2}{S^2} = 150,01$$

2. Untuk faktor perbandingan luasan :

$$F_{Bhitung} = \frac{S_B^2}{S^2} = 183,40$$

3. Untuk faktor jarak dan perbandingan luasan :

$$F_{AB hitung} = \frac{S_{AB}^2}{S^2} = 0,34$$

Dari perhitungan diatas diperoleh tabel analisa varian dua arah sebagai berikut:

**Tabel 4.4** Hasil Analisis Varian Dua arah

Sumber Keragaman	Db	JK	Varian(KT)	F <sub>hitung</sub>	F <sub>tabel</sub>
Pengaruh A	4	89.883,36	22.470,83	150,01	2,46
Pengaruh B	4	109.894,58	27.473.64	183,40	2,46
Interaksi A dan B	16	815,08	50,94	0,34	1,7
Galat	100	14.979,45	149,79		
Total	124	215.572,5			

Keterangan:

A = Jarak

B = Perbandingan luasan (K/A)

Perhitungan analisis statistik menggunakan bantuan program *Microsoft Excel* ditabelkan dalam tabel 4.2 berikut:

**Tabel 4.5** Verifikasi analisis varian menggunakan program *Microsoft Excel*

Anova: Two-Factor With Replication						
<b>SUMMARY</b>						
	10	15	20	25	30	Total
Count	5	5	5	5	5	25
Sum	-2327.68	-2234.34	-2058.77	-2008.95	-1932.5	-10562.2
Average	-465.536	-446.867	-411.754	-401.791	-386.499	-422.489
Variance	77.82919	67.54213	126.0406	152.2754	80.73693	977.04
<b>0.33</b>						
Count	5	5	5	5	5	25
Sum	-2430.06	-2340.25	-2175.29	-2103.15	-2005.68	-11054.4
Average	-486.012	-468.05	-435.057	-420.63	-401.136	-442.177
Variance	51.77889	40.59357	150.5589	144.7924	255.9859	1105.267
<b>0.5</b>						
Count	5	5	5	5	5	25
Sum	-2307.91	-2217.37	-2041.09	-1958.38	-1861.43	-10386.2
Average	-461.582	-443.474	-408.217	-391.675	-372.285	-415.447
Variance	128.9674	60.94427	115.9604	261.0097	143.6167	1242.218
<b>1</b>						
Count	5	5	5	5	5	25
Sum	-2307.91	-2217.37	-2041.09	-1958.38	-1861.43	-10386.2
Average	-461.582	-443.474	-408.217	-391.675	-372.285	-415.447
Variance	128.9674	60.94427	115.9604	261.0097	143.6167	1242.218
<b>2</b>						
Count	5	5	5	5	5	25
Sum	-2088.9	-2012.57	-1874.73	-1811.37	-1722.25	-9509.82
Average	-417.78	-402.515	-374.946	-362.275	-344.449	-380.393
Variance	57.88199	71.17523	148.3451	144.9991	168.8373	835.4367
<b>3</b>						
Count	5	5	5	5	5	25
Sum	-2041.77	-1981.27	-1834.45	-1748.84	-1652.8	-9259.13
Average	-408.353	-396.253	-366.891	-349.768	-330.56	-370.365
Variance	124.7391	137.2713	224.74	345.643	462.5993	1077.085
<b>Total</b>						
Count	25	25	25	25	25	
Sum	-11196.3	-10785.8	-9984.33	-9630.7	-9174.65	
Average	-447.853	-431.432	-399.373	-385.228	-366.986	
Variance	994.759	854.1525	785.2464	873.4173	895.6703	
<b>ANOVA</b>						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	89883.36	4	22470.84	150.0111	2.43E-41	2.462613
Columns	109894.6	4	27473.65	183.4089	4.02E-45	2.462613
Interaction	815.0802	16	50.94251	0.340083	0.991349	1.745647
Within	14979.45	100	149.7945			
Total	215572.5	124				

Hasil kedua perhitungan analisis menunjukkan nilai yang sama sesuai tabel 4.4 dan 4.5 sehingga dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1.  $F_A \text{ hitung} > F_A \text{ tabel}$ , maka  $H_0^A$  ditolak dan  $H_1^A$  diterima, Hal ini menunjukkan bahwa ada perbedaan yang nyata perlakuan jarak terhadap efektivitas proteksi sistem ICCP dengan tingkat keyakinan 95% .
2.  $F_B \text{ hitung} > F_B \text{ tabel}$ , maka  $H_0^B$  ditolak dan  $H_1^B$  diterima, Hal ini menunjukkan bahwa ada perbedaan yang nyata perlakuan perbandingan luasan terhadap efektivitas proteksi sistem ICCP dengan tingkat keyakinan 95%.
3.  $F_{AB} \text{ hitung} > F_{AB} \text{ tabel}$ , maka  $H_0^{AB}$  ditolak dan  $H_1^{AB}$  diterima, Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang nyata pada perlakuan interaksi jarak dan perbandingan luasan terhadap efektivitas proteksi sistem ICCP dengan tingkat keyakinan 95%.



#### 4.5.3 Analisis Regresi

Berdasarkan data variabel bebas dan variabel terikatnya dapat dilakukan perhitungan secara matematik yaitu dengan persamaan regresi *polynomial* dengan persamaan umum sebagai berikut:

$$y = b_0 + b_1X + b_2X^2$$

##### 4.2.2.1 Analisa Regresi Variasi Jarak

Dari persamaan  $y = b_0 + b_1X + b_2X^2$  dapat dicari persamaan regresi polinomial untuk data potensial terukur untuk berbagai variasi jarak pada perbandingan luasan (K/A) 0,33. Untuk memudahkan dalam mencari persamaan regresi maka dapat dibuat tabel sebagai berikut:

**Tabel 4.6** Data regresi pada variasi perbandingan luasan (K/A) = 0,33

No	x	y	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>	x <sup>4</sup>	xy	x <sup>2</sup> y
1	10	-475	100	1000	10000	-4751	-47507
2	10	-460	100	1000	10000	-4604	-46045
3	10	-466	100	1000	10000	-4656	-46561
4	10	-454	100	1000	10000	-4537	-45367
5	10	-473	100	1000	10000	-4729	-47287
6	15	-450	225	3375	50625	-6755	-101323
7	15	-440	225	3375	50625	-6607	-99101
8	15	-436	225	3375	50625	-6540	-98104
9	15	-452	225	3375	50625	-6786	-101783
10	15	-455	225	3375	50625	-6828	-102414
11	20	-418	400	8000	160000	-8363	-167269
12	20	-392	400	8000	160000	-7845	-156901
13	20	-420	400	8000	160000	-8405	-168096
14	20	-414	400	8000	160000	-8279	-165570
15	20	-414	400	8000	160000	-8284	-165672
16	25	-410	625	15625	390625	-10252	-256302
17	25	-380	625	15625	390625	-9503	-237572
18	25	-409	625	15625	390625	-10220	-255497
19	25	-406	625	15625	390625	-10143	-253579
20	25	-404	625	15625	390625	-10106	-252646
21	30	-398	900	27000	810000	-11938	-358141
22	30	-377	900	27000	810000	-11318	-339536
23	30	-392	900	27000	810000	-11768	-353025
24	30	-387	900	27000	810000	-11614	-348406
25	30	-378	900	27000	810000	-11338	-340138
Jumlah	500	-10562	11250	275000	7106250	-206166	-4553844

Keterangan : y = Potensial terukur ( mV vs Ag )

x = Jarak (cm)

Untuk memperoleh persamaan regresi dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$\Sigma Y = n.b_0 + b_1.\Sigma X + b_2.\Sigma X^2.$$

$$\Sigma XY = b_0 \Sigma X + b_1.\Sigma X^2 + b_2.\Sigma X^3$$

$$\Sigma X^2Y = b_0 \Sigma X^2 + b_1.\Sigma X^3 + b_2.\Sigma X^4$$

Sehingga,

$$-10562 = 25 b_0 + 500b_1 + 11250b_2$$

$$-206166 = 375b_0 + 11250b_1 + 275000b_2$$

$$-4553844 = 11250b_0 + 275000b_1 + 7106250b_2$$

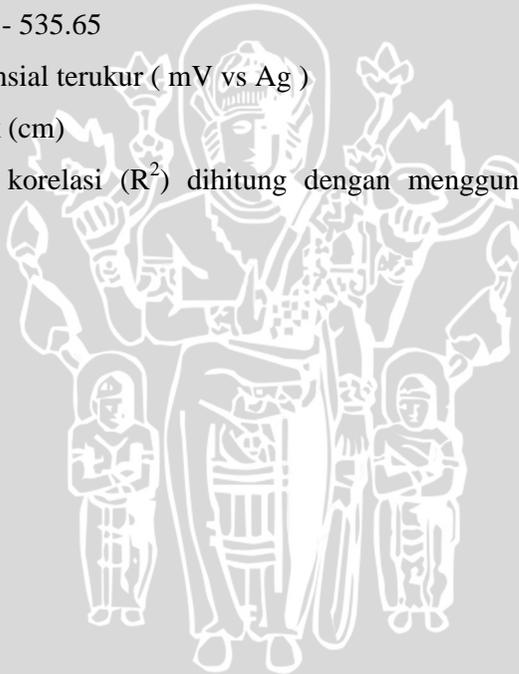
Dengan menyelesaikan persamaan-persamaan diatas, maka bisa diperoleh harga koefisien regresi yaitu;  $b_0 = - 535.65$ ;  $b_1 = 7.7093$ ;  $b_2 = -0.0912$ . Sehingga diperoleh persamaan regresi sebagai berikut:

$$y = -0.0912x^2 + 7.7093x - 535.65$$

Keterangan :  $y$  = Potensial terukur ( mV vs Ag )

$x$  = Jarak (cm)

Harga koefisien korelasi ( $R^2$ ) dihitung dengan menggunakan bantuan tabel sebagai berikut:



**Tabel 4.7** Perhitungan koefisien korelasi pada variasi jarak 10 cm

No	x	y <sub>aktual</sub>	(y-yr) <sup>2</sup>	y <sub>regresi</sub>	(y <sub>regresi</sub> -yr) <sup>2</sup>
1	10	-475	2764.947	-467.677	2041.935
2	10	-460	1440.992	-467.677	2041.935
3	10	-466	1859.720	-467.677	2041.935
4	10	-454	972.460	-467.677	2041.935
5	10	-473	2538.211	-467.677	2041.935
6	15	-450	774.897	-440.525	325.299
7	15	-440	322.589	-440.525	325.299
8	15	-436	182.968	-440.525	325.299
9	15	-452	892.838	-440.525	325.299
10	15	-455	1068.258	-440.525	325.299
11	20	-418	18.630	-417.932	20.774
12	20	-392	914.342	-417.932	20.774
13	20	-420	5.063	-417.932	20.774
14	20	-414	73.337	-417.932	20.774
15	20	-414	69.049	-417.932	20.774
16	25	-410	153.897	-399.896	510.484
17	25	-380	1795.547	-399.896	510.484
18	25	-409	187.550	-399.896	510.484
19	25	-406	280.985	-399.896	510.484
20	25	-404	333.302	-399.896	510.484
21	30	-398	602.931	-386.417	1301.196
22	30	-377	2045.451	-386.417	1301.196
23	30	-392	914.399	-386.417	1301.196
24	30	-387	1251.186	-386.417	1301.196
25	30	-378	1985.409	-386.417	1301.196
Jumlah	500	-10562	23448.960	-10562.235	20998.438

Dengan :  $Y_r = Y_{rata-rata} = \frac{\sum Y_{aktual}}{N} = \frac{-10562}{25} = -422.48$

Sehingga diperoleh koefisien korelasi sebagai berikut:

$$R^2 = \frac{\sum(Y_{yregresi} - Y_r)}{\sum(Y_{aktual} - Y_r)^2} = 0,8954$$

Dengan cara yang sama didapatkan persamaan regresi dan koefisien korelasi sebagai berikut:

- a. Untuk variasi perbandingan luasan (K/A) = 0,33

$$y = -0.0912x^2 + 7.7093x - 535.65$$

$$R^2 = 0.8954$$

b. Untuk variasi perbandingan luasan (K/A) = 0,5

$$y = -0.0443x^2 + 6.1149x - 544.55$$

$$R^2 = 0.8922$$

c. Untuk variasi perbandingan luasan (K/A) = 1

$$y = -0.0461x^2 + 6.4537x - 523.75$$

$$R^2 = 0.8933$$

d. Untuk variasi perbandingan luasan (K/A) = 2

$$y = -0.0279x^2 + 4.8556x - 464.93$$

$$R^2 = 0.8728$$

e. Untuk variasi perbandingan luasan (K/A) = 3

$$y = 0.0056x^2 + 3.8155x - 449.22$$

$$R^2 = 0.7899$$



**4.2.2.1 Analisa Regresi Perbandingan luasan (K/A)**

Dari persamaan  $y = b_0 + b_1X + b_2X^2$  dapat dicari persamaan regresi polinomial potensial terukur untuk berbagai perbandingan luasan (K/A) pada variasi jarak 10 cm Untuk memudahkan dalam mencari persamaan regresi maka dapat dibuat tabel sebagai berikut:

**Tabel 4.8** Regresi untuk variasi perbandingan luasan pada jarak 10 cm

No	x	y	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>	x <sup>4</sup>	xy	x <sup>2</sup> y
1	0.33	-475	0.11	0.04	0.01	-156.77	-51.74
2	0.33	-460	0.11	0.04	0.01	-151.95	-50.14
3	0.33	-466	0.11	0.04	0.01	-153.65	-50.71
4	0.33	-454	0.11	0.04	0.01	-149.71	-49.41
5	0.33	-473	0.11	0.04	0.01	-156.05	-51.50
6	0.50	-496	0.25	0.13	0.06	-247.92	-123.96
7	0.50	-478	0.25	0.13	0.06	-238.83	-119.42
8	0.50	-481	0.25	0.13	0.06	-240.35	-120.17
9	0.50	-486	0.25	0.13	0.06	-243.16	-121.58
10	0.50	-490	0.25	0.13	0.06	-244.78	-122.39
11	1	-476	1.00	1.00	1.00	-476.16	-476.16
12	1	-454	1.00	1.00	1.00	-453.70	-453.70
13	1	-461	1.00	1.00	1.00	-460.90	-460.90
14	1	-448	1.00	1.00	1.00	-448.03	-448.03
15	1	-469	1.00	1.00	1.00	-469.13	-469.13
16	2	-422	4.00	8.00	16.00	-844.25	-1688.50
17	2	-413	4.00	8.00	16.00	-825.31	-1650.62
18	2	-414	4.00	8.00	16.00	-828.29	-1656.57
19	2	-411	4.00	8.00	16.00	-821.90	-1643.80
20	2	-429	4.00	8.00	16.00	-858.06	-1716.11
21	3	-427	9.00	27.00	81.00	-1280.58	-3841.74
22	3	-399	9.00	27.00	81.00	-1198.39	-3595.18
23	3	-400	9.00	27.00	81.00	-1199.78	-3599.34
24	3	-409	9.00	27.00	81.00	-1228.36	-3685.07
25	3	-406	9.00	27.00	81.00	-1218.18	-3654.55
Jumlah	34.15	-11196	71.79	180.80	490.37	-14594.18	-29900.41

Keterangan : y = Potensial terukur ( mV vs Ag )

x = Perbandingan luasan (K/A)

Untuk memperoleh persamaan regresi dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$\Sigma Y = n.b_0 + b_1\Sigma X + b_2\Sigma X^2.$$

$$\Sigma XY = b_0\Sigma X + b_1\Sigma X^2 + b_2\Sigma X^3$$

$$\Sigma X^2Y = b_0\Sigma X^2 + b_1\Sigma X^3 + b_2\Sigma X^4$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} -11196 &= 25 b_0 + 34,15b_1 + 71,7945b_2 \\ -14594.18 &= 34,15b_0 + 71,7945b_1 + 180,80b_2 \\ -29900.41 &= 71,7945b_0 + 180,80b_1 + 490,37b_2 \end{aligned}$$

Dengan menyelesaikan persamaan-persamaan diatas, maka bisa diperoleh harga koefisien regresi yaitu;  $b_0 = - 492,67$ ;  $b_1 = 41,603$ ;  $b_2 = -4,1838$ . Sehingga diperoleh persamaan regresi sebagai berikut:

$$y = -4.1838x^2 + 41.603x - 492.67$$

Keterangan :  $y$  = Potensial terukur ( mV vs Ag )  
 $x$  = Perbandingan luasan (K/A)

Harga koefisien korelasi ( $R^2$ ) dihitung dengan menggunakan bantuan tabel sebagai berikut:

**Tabel 4.9** Perhitungan Koefisien untuk variasi perbandingan pada jarak 10 cm

No	x	y <sub>aktual</sub>	(y-yr) <sup>2</sup>	y <sub>regresi</sub>	(y <sub>regresi</sub> -yr) <sup>2</sup>
1	0.33	-475	740.896	-479.394	994.865
2	0.33	-460	158.685	-479.394	994.865
3	0.33	-466	315.457	-479.394	994.865
4	0.33	-454	33.883	-479.394	994.865
5	0.33	-473	625.865	-479.394	994.865
6	0.5	-496	2301.860	-472.912	627.967
7	0.5	-478	888.503	-472.912	627.967
8	0.5	-481	1078.468	-472.912	627.967
9	0.5	-486	1479.554	-472.912	627.967
10	0.5	-490	1739.381	-472.912	627.967
11	1	-476	801.431	-455.248	54.694
12	1	-454	34.180	-455.248	54.694
13	1	-461	170.177	-455.248	54.694
14	1	-448	0.030	-455.248	54.694
15	1	-469	452.545	-455.248	54.694
16	2	-422	661.883	-426.197	468.988
17	2	-413	1238.820	-426.197	468.988
18	2	-414	1136.326	-426.197	468.988
19	2	-411	1361.827	-426.197	468.988
20	2	-429	354.385	-426.197	468.988
21	3	-427	440.703	-405.513	1792.690
22	3	-399	2341.379	-405.513	1792.690
23	3	-400	2296.861	-405.513	1792.690
24	3	-409	1474.575	-405.513	1792.690
25	3	-406	1746.541	-405.513	1792.690
Jumlah	34.15	-11196	23874.216	-11196.320	19696.019

$$\text{Dengan : } Yr = Y_{rata-rata} = \frac{\sum Y_{aktual}}{N} = \frac{-11196}{25} = -447,84$$

Sehingga diperoleh koefisien korelasi sebagai berikut:

$$R^2 = \frac{\sum(Y_{yregresi} - Yr)}{\sum(Y_{aktual} - Yr)^2} = 0,82499$$

Dengan cara yang sama didapatkan persamaan regresi dan koefisien korelasi sebagai berikut:

- a. Untuk variasi jarak 10 cm

$$y = -4.1838x^2 + 41.603x - 492.67$$

$$R^2 = 0.825$$

- b. Untuk variasi jarak 15 cm

$$y = -4.7962x^2 + 41.217x - 473.96$$

$$R^2 = 0.8071$$

- c. Untuk variasi jarak 20 cm

$$y = -3.8272x^2 + 35.564x - 436.96$$

$$R^2 = 0.7134$$

- d. Untuk variasi jarak 25 cm

$$y = -4.0715x^2 + 37.788x - 425.15$$

$$R^2 = 0.7232$$

- e. Untuk variasi jarak 30 cm

$$y = -4.5977x^2 + 40.089x - 408.54$$

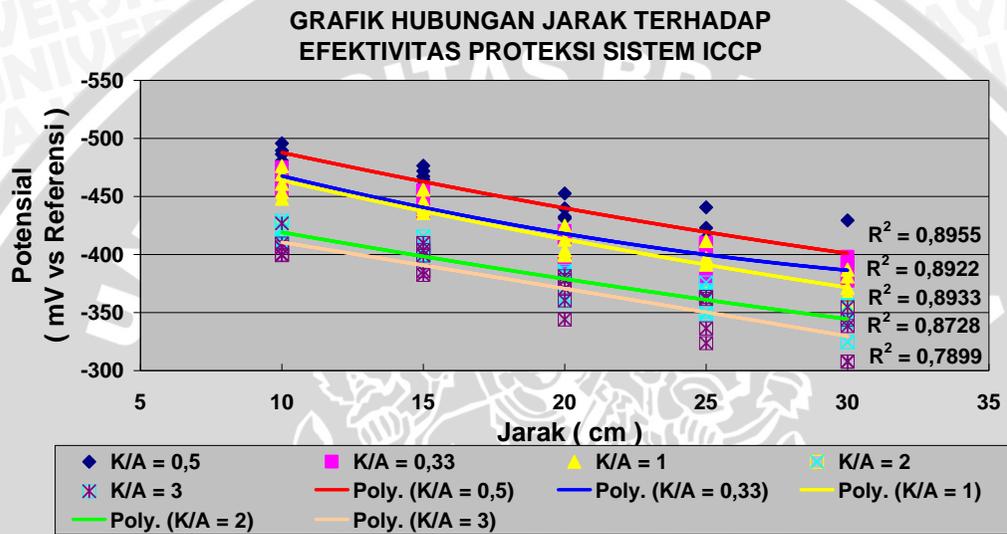
$$R^2 = 0.7407$$



#### 4.6 Pembahasan

Hasil uji kecukupan data observasi menunjukkan bahwa jumlah data (N) lebih besar daripada jumlah data minimum (N'), yang artinya bahwa jumlah pengulangan percobaan yang dilakukan pada penelitian ini dinilai mencukupi dan tidak diperlukan lagi data tambahan.

##### 4.6.1 Analisa Grafik Hubungan Antara Jarak Elektroda Terhadap Efektivitas Proteksi Sistem ICCP



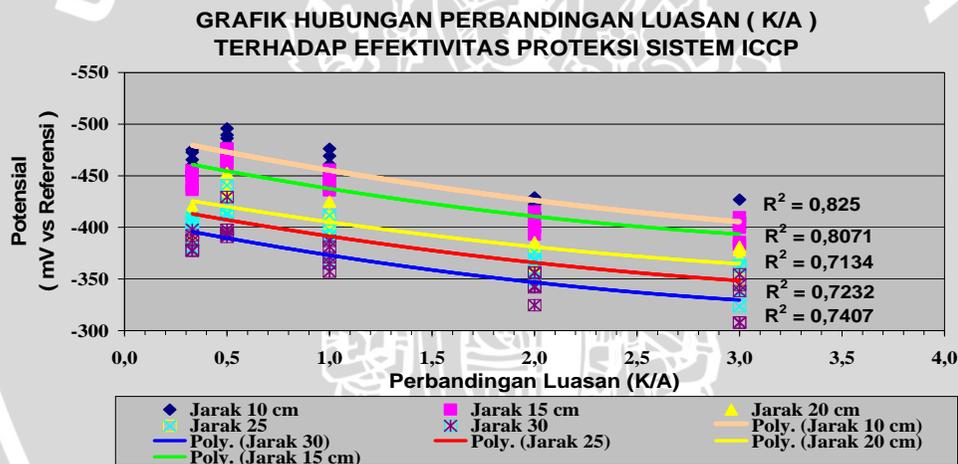
**Gambar 4.1** Grafik hubungan antara jarak elektroda terhadap efektivitas proteksi sistem ICCP

Grafik pada gambar 4.1 menunjukkan *trend* data perubahan potensial terukur akibat perubahan jarak. Sumbu datar adalah jarak sedangkan sumbu tegak adalah potensial terukur. Dari grafik dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya jarak maka potensial terukurnya juga cenderung mengalami penurunan. Dengan menggunakan analisis varian didapatkan bahwa  $F_{hitung} = 150.01$  sedangkan  $F_{tabel}$  nya sebesar 2,46 sehingga  $F_{hitung}$  lebih besar daripada  $F_{tabel}$ , yang berarti bahwa perbedaan jarak berpengaruh terhadap potensial yang terukur. Semakin rendah atau semakin negatif potensial listrik menunjukkan bahwa efektivitas proteksi sistem ICCP meningkat atau semakin efektif. Semakin dekat jarak antar elektroda menyebabkan resistansi elektrik sistem semakin kecil sehingga arus listrik yang mengalir cenderung semakin besar. Meningkatnya arus listrik ini akan menyebabkan rapat arus pada katoda akan meningkat pula, sehingga jumlah elektron tiap satuan luas yang digunakan untuk proteksi meningkat.

Semakin negatif potensial listrik suatu logam terhadap lingkungan, menyebabkan logam tersebut tidak akan mengalami oksidasi terhadap lingkungan sehingga logam tersebut tidak akan terkorosi. Justru semakin negatif potensial listrik suatu logam terhadap lingkungan akan menyebabkan lingkungan tersebut teroksidasi.

Logam referensi pada penelitian ini merupakan indikator dari lingkungan, jadi semakin negatif suatu logam terhadap referensi menunjukkan bahwa logam tersebut semakin negatif pula terhadap lingkungan. Dari hasil penelitian didapatkan tidak ada baja yang mengalami perubahan berat setelah dilakukan pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa semua logam terproteksi terhadap serangan korosi. Fakta ini didukung pula oleh hasil penelitian yang menunjukkan bahwa semua logam mempunyai potensial lebih negatif daripada lingkungan.

#### 4.6.2 Analisa Grafik Hubungan Antara Perbandingan Luasan (K/A) Terhadap Efektivitas Proteksi Sistem ICCP



**Gambar 4.2** Grafik hubungan perbandingan luasan (K/A) terhadap efektivitas proteksi sistem ICCP

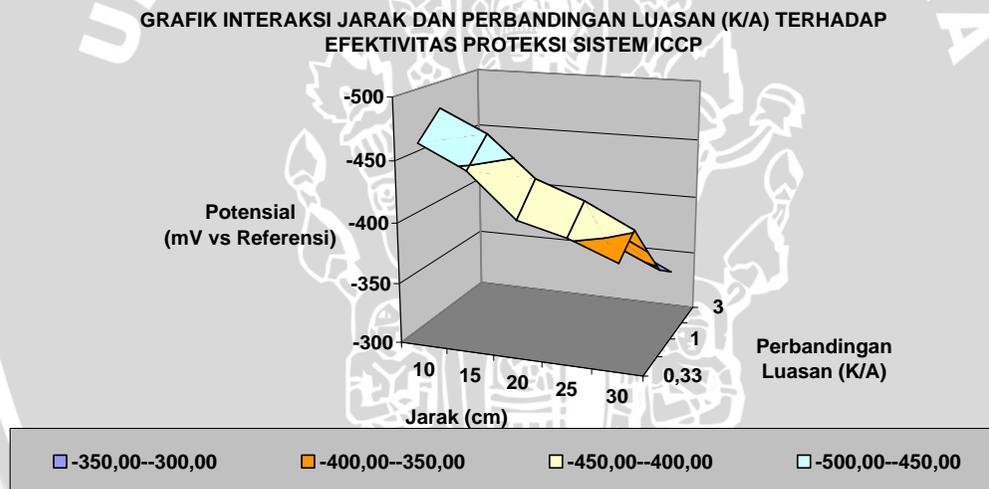
Grafik pada gambar 4.2 menunjukkan *trend* data perubahan potensial terukur akibat perubahan perbandingan luasan (K/A). Sumbu datar adalah perbandingan luasan (K/A) sedangkan sumbu tegak adalah potensial terukur. Dari grafik dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya perbandingan luasan (K/A) maka potensial terukurnya juga cenderung mengalami peningkatan. Dengan menggunakan analisis varian didapatkan bahwa  $F_{hitung} = 183,40$  sedangkan  $F_{tabel}$  nya sebesar 2,46. sehingga  $F_{hitung}$  lebih besar daripada  $F_{tabel}$ , yang berarti bahwa perbedaan perbandingan luasan (K/A) berpengaruh

terhadap potensial yang terukur. Semakin rendah atau semakin negatif potensial listrik menunjukkan bahwa efektivitas proteksi sistem ICCP meningkat atau semakin efektif.

Perbandingan luasan (K/A) bernilai kurang dari satu apabila luasan anoda lebih rendah daripada luasan katoda. Semakin besar perbandingan luasan (K/A) menyebabkan rapat arus pada katoda semakin besar dan seragam. Akibatnya elektron yang digunakan untuk proteksi terhadap serangan korosi juga akan semakin efektif. Hal inilah yang menyebabkan bahwa potensial hasil pengukuran terhadap referensi didapatkan semakin negatif.

#### 4.3.1 Analisa Grafik Interaksi Antara Jarak dan Perbandingan Luasan (K/A) Terhadap Efektivitas Proteksi sistem ICCP

Dari hasil penelitian digambarkan grafik visual tiga dimensi interaksi antara jarak dan perbandingan luasan (K/A) terhadap efektivitas proteksi sistem ICCP seperti terlihat pada gambar 4.3 di bawah ini:



**Gambar 4.3** Grafik interaksi jarak dan perbandingan luasan (K/A) terhadap efektivitas proteksi sistem ICCP

Grafik pada gambar 4.3 diatas menunjukkan *trend* data perubahan *potensial* terukur akibat variasi jarak dan perbandingan luasan (K/A) . Dari analisis varian data didapatkan bahwa  $F_{AB \text{ hitung}} = 0,34$  sedangkan  $F_{AB \text{ kritis}}$  nya sebesar 1,74. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa  $F_{\text{hitung}}$  lebih kecil daripada  $F_{\text{tabel}}$  yang artinya tidak terdapat interaksi antara jarak dan perbandingan luasan (K/A) terhadap efektivitas proteksi sistem ICCP. Hal ini menunjukkan bahwa kedua variabel tidak saling terkait sehingga perubahan terhadap tiap variabel dapat dilakukan dengan tanpa memperhatikan variabel lain.

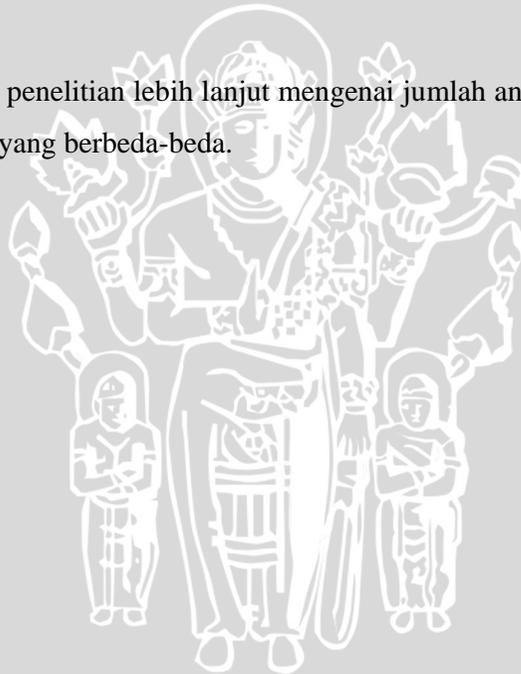
## BAB V PENUTUP

### 5.3 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh didapatkan bahwa semakin pendek jarak antar elektroda pada sistem ICCP mengakibatkan efektivitas proteksi terhadap korosinya akan semakin bagus. Semakin kecil perbandingan luasan anoda banding katoda (K/A) pada sistem ICCP juga mengakibatkan efektivitas proteksi terhadap korosinya akan semakin bagus. Antara faktor jarak dan faktor perbandingan luasan (K/A) tidak saling terkait sehingga perubahan terhadap tiap faktor tersebut dapat dilakukan dengan tanpa memperhatikan faktor lain

### 5.4 Saran

Sebaiknya dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai jumlah anoda yang digunakan khususnya dengan jarak yang berbeda-beda.



## DAFTAR PUSTAKA

- Jurusan Pendidikan Kimia**, 2002, Pembelajaran Elektrokimia Melalui Hypertext, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Pendidikan Indonesia: [www.kimia.upi.edu/utama/bahanajar/kimia\\_dasar/elektrokimia/default.htm](http://www.kimia.upi.edu/utama/bahanajar/kimia_dasar/elektrokimia/default.htm)
- Northern Arizona Wind & Sun** , 2006, What is Cathodic Protection, Arizona, [http://www.windsun.com/CP\\_Stuff/What\\_is\\_CP.htm](http://www.windsun.com/CP_Stuff/What_is_CP.htm)
- Nugroho**, Dipo, 2006, Korosi Pada Stainless Steel: [http://www.tasteel.com/ is-korosistainless.htm](http://www.tasteel.com/is-korosistainless.htm)
- Rochim**, Suratman, 12 Maret 2005, Teknologi Perlindungan Logam, Seminar Nasional: Aplikasi Teknologi Perlindungan Logam di Industri: Teknik Metalurgi Universitas Jenderal Achmad Yani Bandung.
- Surdia**, Tata, (2000), *Pengetahuan Bahan dan Tehnik*, Jakarta: PT. Pradya Paramita.

