BAB IV
HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA

Pada penelitian tugas akhir ini, dilakukan beberapa pengujian untuk memperoleh data-data *real* yang dapat dianalisa dan dapat menghasilkan kesimpulan yang cukup akurat dan relevan terhadap penelitian Tugas Akhir yang dilakukan.

4.1 Metode dan Hasil Pengujian

Metode pengujian yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini, merupakan metode pengujian yang penulis anggap tepat dan dapat memenuhi kebutuhan data-data yang diperlukan dalam membangun sistem yang dibuat. Data-data hasil pengujian penulis sampaikan dalam bentuk tabel agar lebih memudahkan untuk dianalisa dan dalam pengambilan kesimpulan terhadap hasil yang diperoleh.

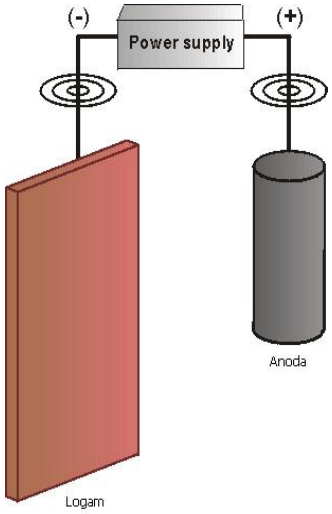
4.1.1 Uji Kebutuhan Arus

Uji kebutuhan arus adalah pengujian yang dilakukan sebelum sistem dibuat untuk mengetahui kebutuhan arus logam pada kondisi lingkungan dimana sistem akan diterapkan, sehingga akan lebih mudah menentukan parameter sistem yang dibuat agar dapat berjalan pada kondisi lingkungan tersebut.

Pengujian dilakukan dengan menerapkan metode ICCP secara konvensional atau manual pada berbagai nilai besaran arus yang diberikan. Skema rangkaiannya seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.1.

Logam baja karbon rendah berukuran 10 x 10 x 0,2 cm digunakan sebagai sampel, untuk dicari besar kebutuhan arusnya ketika berada pada lingkungan uji. Dengan mengetahui besar kebutuhan arus untuk melindungi logam pada lingkungan uji tersebut, maka besarnya nilai rapat arus untuk melindungi logam

dari proses korosi pun dapat diketahui. Nilai tersebut kemudian dapat dijadikan acuan untuk pengujian logam pada lingkungan uji lainnya.



Gambar 4.1. Rangkaian ICCP konvensional

Pengujian dilakukan selama 24 jam pada tiap nilai besaran arus yang diberikan, dan kemudian diamati perubahan kondisi logam secara visual sampai pada kondisi logam terkorosi. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil pengujian kebutuhan arus

Kondisi OFF		Kondisi ON		Hasil Pengujian
I (mA)	V (Volt)	I (mA)	V (Volt)	
-0,02	0,13	5,00	4,04	Terproteksi
-0,44	1,27	4,00	3,46	Terproteksi
-0,43	1,40	3,00	3,12	Terproteksi
-0,24	1,57	2,00	2,59	Permukaan belakang terkorosi
-0,20	1,64	1,00	2,29	Permukaan belakang terkorosi
-0,10	1,47	0,50	1,79	Seluruh Permukaan terkorosi

Dari pengujian yang dilakukan diketahui bahwa logam akan mulai terkorosi jika diberikan arus dibawah 3 mA. Dengan menggunakan arus sebesar 3 mA sebagai basis, logam kemudian diujikan pada berbagai jenis lingkungan untuk melihat apakah logam tersebut masih tetap bisa terlindungi dari korosi. Hasilnya terlihat pada tabel 4.2, pH lingkungan uji diukur menggunakan indikator pH universal.

Tabel 4.2. Hasil pengujian logam pada berbagai lingkungan

Lingkungan Uji	pH	I (mA)	Hasil Pengujian
Air Ledeng	6	3,00	Terproteksi
Air Laut	7	3,00	Terproteksi
Larutan Cuka	4	3,00	Terproteksi
Larutan Kapur	12	3,00	Terproteksi, terbentuk endapan kapur

Dengan menggunakan persamaan 2.7 maka nilai rapat arus dari logam secara *real* dapat diketahui. Luas permukaan logam baja adalah 10 x 10 x 0,2 cm (0,0208 m^2).

$$IP = AP\,x\,i$$
$$3\ mA = 0{,}0208\,m^2\,x\,i$$
$$i = 144\ mA/m^2$$

Rapat arus logam baja karbon yang digunakan adalah 144 mA/m^2

4.1.2 Uji Berat

Uji berat digunakan untuk mengetahui laju korosi yang terjadi pada logam uji per tahun, jika pada logam tersebut tidak dilakukan metode perlindungan apapun. Pengujian dilakukan selama 7 hari, berat logam sebelum dan sesudah dilakukan pengujian ditimbang, kemudian selisih beratnya dihitung untuk mencari laju korosi pada logam tersebut. Lingkungan yang digunakan berupa air ledeng dan air laut yang berada pada suhu kamar.

Tabel 4.3. Hasil uji berat logam

Lingkungan Uji	Berat Awal	Berat Akhir	Selisih Berat
Air Ledeng	202,20 gr	202,1 gr	0,1 gr
Air Laut	202,10 gr	199,8 gr	2,3 gr

Besarnya laju korosi pada logam per tahunnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6. Perhitungan laju korosi pada air ledeng dan air laut: Luas permukaan logam = 0,0208 m^2, berat jenis logam = 7,85 gr/cm^3, lama perendaman = 7 hari.

$$Laju\ Korosi = \frac{w}{(A.t.\rho)}$$
$$= \frac{0,1}{(208.7.7,85)}$$
$$= \frac{0,1}{11429,6}$$
$$= 8,749.10^{-6}\ cm/hari$$
$$= 0,0319\ mpy$$

$$Laju\ Korosi = \frac{w}{(A.t.\rho)}$$
$$= \frac{2,3}{(208.7.7,85)}$$
$$= \frac{2,3}{11429,6}$$
$$= 2.10^{-4}\ cm/hari$$
$$= 0,734\ mpy$$

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa laju korosi pada air ledeng adalah sebesar 0,0319 mpy, sedangkan pada air laut lebih besar yaitu 0,734 mpy.

Kondisi permukaan logam setelah dilakukan pengujian selama 7 hari direndam di dalam air ledeng dapat dilihat pada gambar 4.2, sedangkan pada air laut dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.2. Korosi pada logam setelah 7 hari terendam di air ledeng



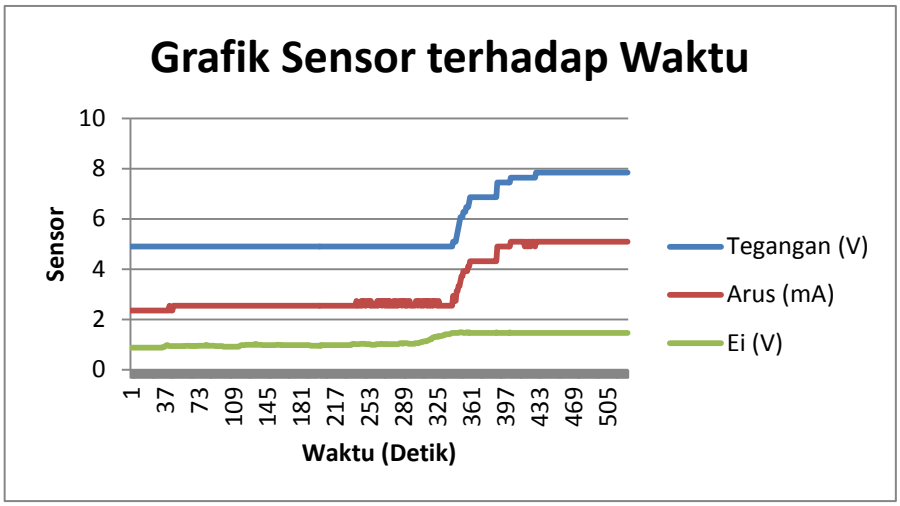
Gambar 4.3. Korosi yang terjadi pada logam setelah 7 hari terendam di air laut

4.1.3 Uji Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk menguji fungsionalitas dan kestabilan sistem yang dibuat dalam melindungi logam. Sistem dibuat untuk mengendalikan arus proteksi pada logam supaya tetap berada pada kriteria perlindungan yaitu antara 0.850 V sampai 1.5 V (dalam nilai absolut) terhadap elektroda referensi Ag/AgCl.

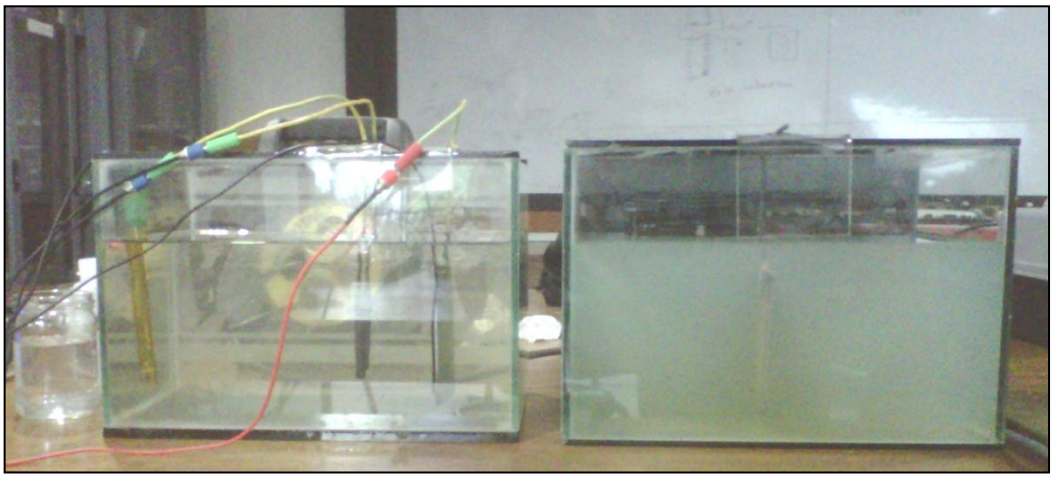
Kondisi sistem dicatat pada *record database* program *data acquisition and monitoring* selama 10 menit sekali selama 12 jam, dan kemudian dilakukan *backup* yang membuat file *copy record data* dengan format Microsoft Access untuk melihat perubahan sistem yang terjadi dan respon yang dilakukan oleh sistem dalam menjaga supaya kebutuhan arus logam tetap terpenuhi sesuai dengan kriteria perlindungan untuk metode proteksi katodik arus paksa.

Grafik hasil pengujian yang dilakukan untuk melihat respon sistem terhadap perubahan pH dapat dilihat pada gambar 4.4, proses pengujian dilakukan pada lingkungan air ledeng dengan pH 6 yang kemudian ditambahkan air cuka sebanyak 180 mL secara perlahan sampai pH lingkungan menjadi pH 3.



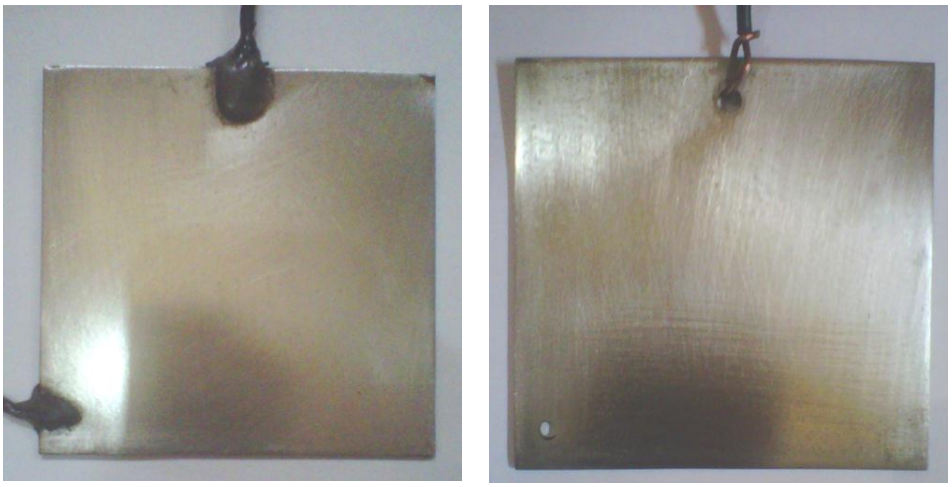
Gambar 4.4. Pengujian respon sistem terhadap perubahan pH

Sebagai perbandingan dilakukan juga pengujian terhadap logam pada berbagai kondisi lingkungan antara logam yang diterapkan metode ICCP dengan logam yang tidak dilindungi sama sekali. Logam baja karbon rendah dengan ukuran yang sama, di tempatkan pada lingkungan yang sama selama 12 jam tanpa perlindungan apa pun. Gambar proses pengujian kedua logam pada lingkungan uji air ledeng dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5. Perbandingan logam yang diuji pada air ledeng

Hasil pengujian logam uji yang dilindungi dengan metode ICCP dengan yang tidak dilindungi dapat dilihat secara visual kondisi permukaan logam antara sebelum dengan sesudah pengujiannya. Gambar sebelah kiri adalah logam yang dilindungi, sedangkan gambar sebelah kanan adalah logam yang tidak dilindungi.

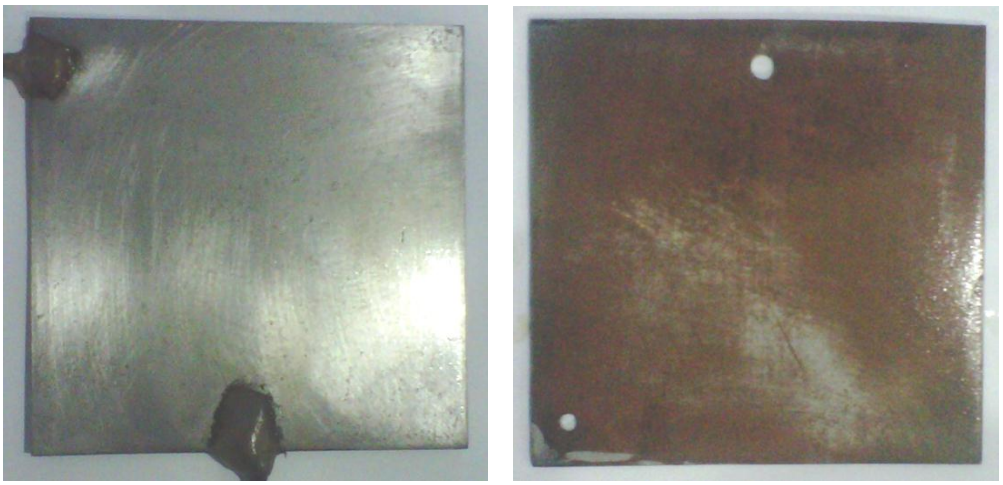


Gambar 4.6. Kondisi permukaan logam sebelum dilakukan pengujian



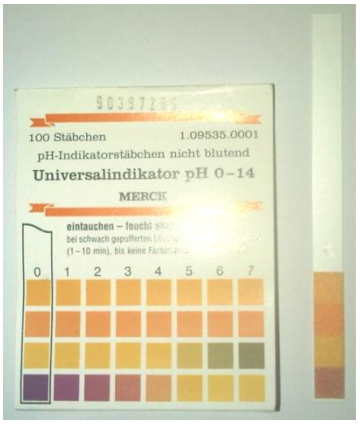
Gambar 4.7. Kondisi permukaan logam setelah pengujian di dalam air ledeng

Pengujian juga dilakukan dengan menggunakan air laut, logam direndam dalam air laut selama 12 jam. Kondisi permukaan logam setelah dilakukan proses pengujian dalam lingkungan uji air laut dapat dilihat pada gambar 4.8. Kondisi permukaan antara yang dilindungi dengan yang tidak dapat terlihat dengan jelas dari adanya karat yang dihasilkannya.



Gambar 4.8. Kondisi permukaan logam setelah pengujian di dalam air laut

Pengujian untuk kondisi keasaman tinggi menggunakan cuka masak sebanyak 180 mL, sehingga pH lingkungan menjadi 3, pengukuran nilai pH menggunakan indikator pH universal seperti yang terlihat pada gambar 4.9, sedangkan hasil pengujiannya dapat dilihat pada gambar 4.10.

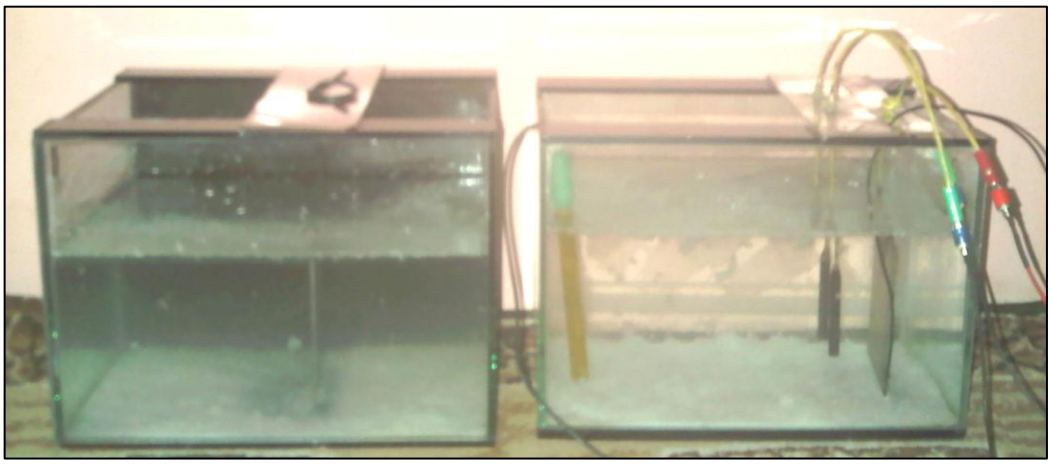


Gambar 4.9. Pengukuran pH air cuka dengan indikator pH Universal



Gambar 4.10. Kondisi permukaan logam setelah pengujian di dalam air cuka

Pengujian terakhir adalah pengujian dengan air kapur yang dicampur dengan air ledeng, dan menghasilkan larutan dengan pH 12. Proses pengujiannya dapat dilihat pada gambar 4.11, sedangkan kondisi permukaan logam setelah pengujian dapat dilihat pada gambar 4.12.

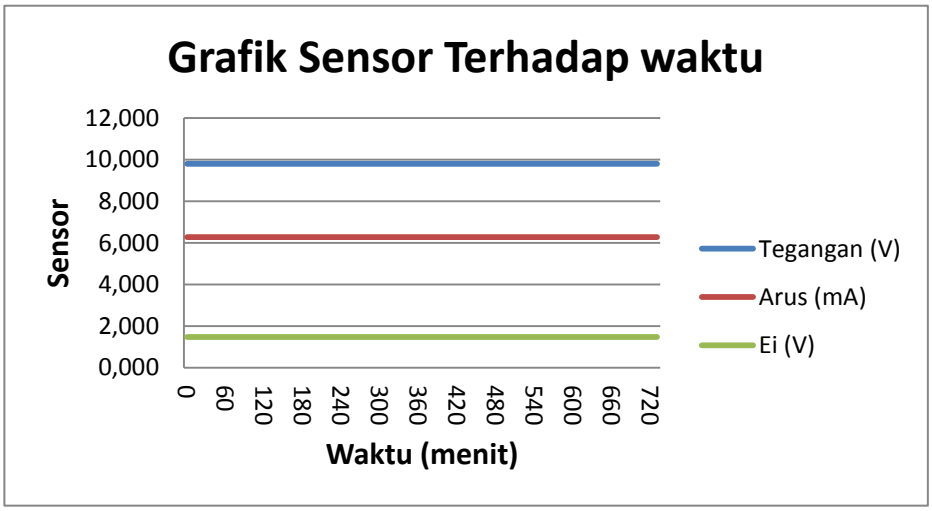


Gambar 4.11. Perbandingan logam yang diuji pada air kapur

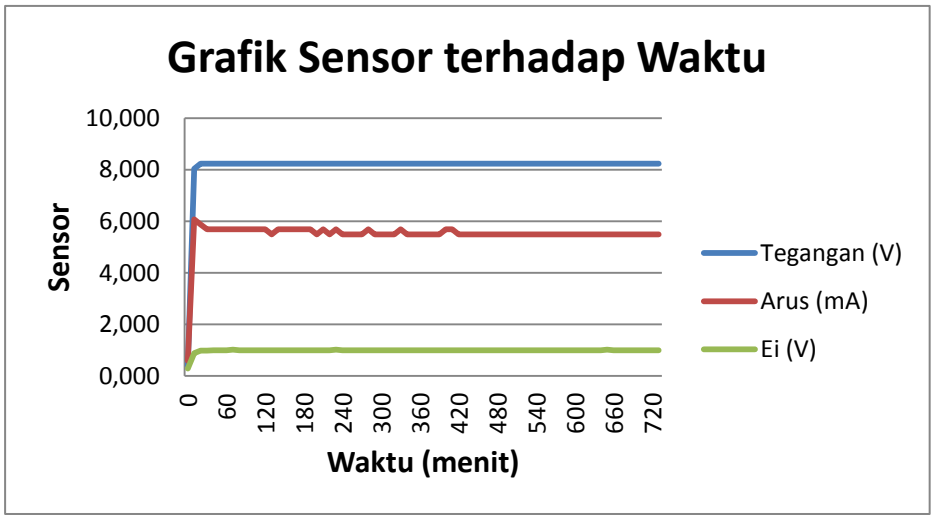


Gambar 4.12. Kondisi permukaan logam setelah pengujian di dalam air kapur

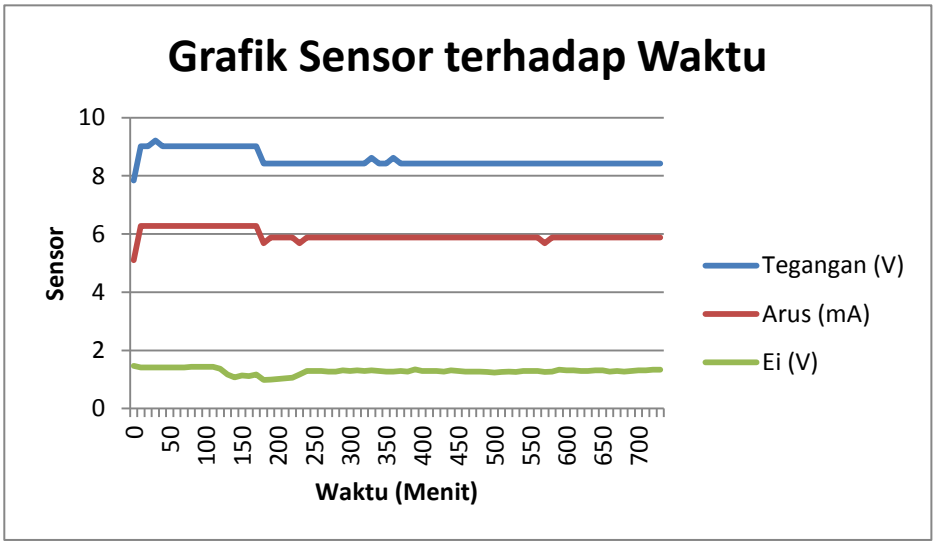
Selama proses perlindungan pada logam berjalan, kondisi sistem terus dipantau dan disimpan dalam *database* secara periodik setiap 10 menit sekali secara otomatis. Data-data kondisi sistem yang disimpan secara otomatis oleh program *data acquisition* dapat dilihat pada lampiran, sedangkan grafik hasil pengukurannya terhadap waktu dapat dilihat pada gambar 4.13, gambar 4.14, gambar 4.15 dan gambar 4.16.



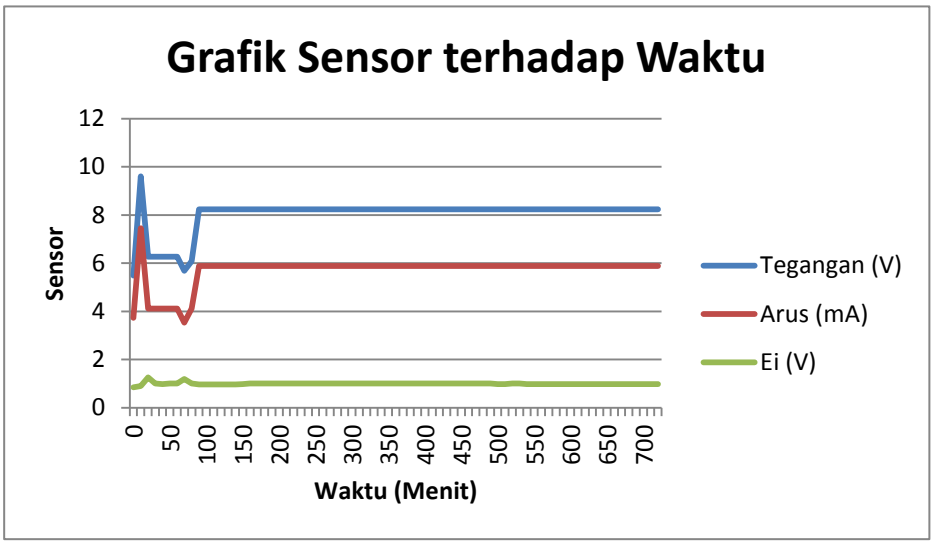
Gambar 4.13. Grafik pengukuran sensor terhadap waktu pada lingkungan air ledeng



Gambar 4.14. Grafik pengukuran sensor terhadap waktu pada lingkungan air laut



Gambar 4.15. Grafik pengukuran sensor terhadap waktu pada lingkungan air cuka



Gambar 4.16. Grafik pengukuran sensor terhadap waktu pada lingkungan air kapur

4.2 Analisa Hasil Pengujian

Setelah melakukan beberapa pengujian dan mendapatkan data-data yang diperlukan, selanjutnya akan dianalisa hasil yang diperoleh dibandingkan dengan teori yang ada dan telah dibahas pada bab 2.

Pada pengujian pertama yaitu untuk mencari kebutuhan arus yang diperlukan dalam melindungi logam, merupakan parameter yang paling penting dalam menerapkan metode ICCP, karena pada dasarnya proses korosi terjadi akibat adanya eksitasi elektron dari struktur logam ketika kontak dengan lingkungan untuk mempertahankan kondisi stabilnya.

Setiap logam memiliki nilai rapat arus dan potensial listriknya masing-masing yang ketika kontak dengan lingkungan nilai tersebut bergeser. Dengan menggunakan metode ICCP potensial listrik dari logam digeser dari nilai yang berada pada daerah korosif ke daerah imun, sehingga dengan mempertahankan potensial logam tetap berada di daerah imun yaitu lebih besar dari 0,850 V (dalam nilai absolut) maka logam tersebut akan terlindungi dari proses korosi.

Pada tahap perancangan secara teori kebutuhan arus untuk menggeser potensial logam ke daerah imun adalah sebesar 5,5952 mA untuk logam berukuran 208 cm^2 (10 x 10 x 0,2 cm), sedangkan pada hasil percobaan diperoleh bahwa logam dapat terlindungi dari korosi jika diberi arus lebih besar dari 3 mA. Perbedaannya cukup besar antara perhitungan secara teori dengan kondisi *real* dengan penerapan metode secara manual, hal tersebut terjadi karena rapat arus dari logam sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan logam, suhu dan lingkungan yang diujikan.

Pada sistem yang dibuat metode ICCP diterapkan dengan membaca perbedaan potensial logam terhadap elektroda referensi (Ei) yang terdapat dalam pH Meter secara periodik. Nilai Ei dipertahankan supaya tetap berada pada kriteria perlindungan untuk metode proteksi katodik, yaitu antara *range* 0,850 sampai 1,5 V (dalam nilai absolut), Ei di bawah 0,850 V maka logam akan terkorosi karena kurangnya arus untuk perlindungan logam, sedangkan Ei di atas 1,5 V logam *over protective* karena berlebihan dalam pemberian arusnya sehingga dapat merusak lingkungan dengan peningkatan nilai pH, pembentukan endapan dan gas hidrogen. Logam dilindungi dengan memberikan arus DC dari *buck-boost converter* yang dikendalikan oleh sinyal PWM dari mikrokontroler. Besarnya keluaran arus yang diberikan oleh *buck-boost converter* disesuaikan secara otomatis dengan nilai Ei yang terbaca sampai tegangan Ei mencapai kriteria proteksi katodik. Semakin besar *duty cycle* dari sinyal PWM yang diberikan, arus dan tegangan keluaran dari *buck-boost converter* pun akan semakin besar, dan semakin besar arus yang diberikan pada logam, maka tegangan Ei akan semakin kecil. Pada gambar 4.4, diperlihat kan grafik respon yang dilakukan oleh sistem kontrol ketika terjadi penambahan nilai pH, besar arus dan tegangan naik secara drastis ketika nilai Ei melewati 1,5 V, sehingga besarnya tegangan Ei turun kembali, tetapi karena pH dalam lingkungan sesudah penambahan tetap, nilai Ei tidak mengalami penurunan lagi, sehingga arus dan tegangan pun tetap karena Ei dipertahankan supaya berada dalam kriteria proteksi katodik.

Proses korosi yang terjadi pada logam uji merupakan proses yang lambat dengan laju korosi sebesar 0,0319 mpy (mm/tahun) jika pada lingkungan air ledeng dan 0,734 mpy pada lingkungan air laut, sehingga dengan ketebalan logam uji sebesar 0,2 cm, akan membutuhkan 62 tahun sampai logam tersebut terkikis habis jika berada pada lingkungan air ledeng, dan 3 tahun jika berada pada lingkungan air laut.

Logam lebih cepat terkorosi di air laut daripada di air ledeng, hal ini wajar karena konsentrasi elektrolit air laut lebih besar daripada air ledeng, seperti yang terlihat pada gambar kondisi permukaan logam setelah pengujian diatas, karat yang terbentuk dari korosi air laut lebih banyak dari pada karat yang terbentuk dari korosi di air ledeng. Ion-ion pada air laut berupa senyawa-senyawa terlarut seperti sampah organik, sampah non organik, jasad renik, dan ion-ion garam, yang menyebabkan logam menjadi aktif, sehingga proses korosi bukan hanya dari ion hidrogen saja, dan yang paling banyak adalah dari ion klorida yang menyebabkan reaksi katoda berkelanjutan.

Pada hasil pengujian sistem dapat terlihat perbedaan antara logam yang dilindungi dengan yang tidak dilindungi, dengan lingkungan uji pada air ledeng, air laut, dan air cuka, sedangkan pada pengujian dengan air kapur tidak terlihat perbedaan sama sekali antara sebelum dan sesudah pengujian, karena pada kondisi basa tidak terjadi proses reduksi logam tetapi terjadi proses pembentukan lapisan kapur pada permukaan logam. Pada kondisi lingkungan lainnya logam yang tidak dilindungi terbentuk residu karat yang berwarna kuning kemerahan yang terlihat jelas pada logam yang berada pada lingkungan air ledeng dan air laut, sedangkan pada lingkungan air cuka residunya berwarna hitam tipis yang menempel pada permukaan logam. Logam yang dilindungi dengan metoda ICCP kondisi permukaannya masih terlihat bagus, tidak terlalu beda jauh dengan kondisi semula, dengan hasil seperti itu sistem yang dibuat sudah dapat melindungi logam dengan baik dari proses korosi.

Data yang diperoleh selama 12 jam ditampilkan dalam bentuk grafik, pada grafik gambar 4.13, nilai tegangan, arus dan Ei digambarkan dengan garis lurus, artinya selama 12 jam pengujian nilai tegangan, arus dan Ei tetap konstan berada

pada kriteria perlindungan, dengan arus sebesar 6,252 mA logam uji berhasil terlindungi dengan baik, sedangkan pada grafik gambar 4.14 terlihat ada perbedaan pada 10 menit pertama dimana nilai tegangan dan arus meningkat dengan drastis seiring dengan meningkatnya nilai Ei, setelah Ei mencapai kriteria perlindungan besarnya arus dipertahankan stabil selama 12 jam pengujian. Garis arus tidak terlihat lurus sempurna, hal tersebut memperlihatkan adanya perubahan pada lingkungan air laut yang jika dilihat pada tabel data hasil pengujiannya terlihat perubahan nilai Ei yang membuat besarnya arus menigkat dan kemudian kembali lagi, hal ini merupakan respon dari sistem pengontrolan yang dibuat nilai tegangan Ei tetap berada pada kriteria proteksi katodik, dan logam pun berhasil dilindungi dengan baik selama 12 jam pengujian dengan besar rata-rata arus sebesar 5,493 mA.

Pada grafik hasil pengujian di dalam air cuka, terlihat banyak lonjakan pada arus dan tegangan, dikarenakan adanya perubahan pada lingkungan yang disebabkan oleh perubahan suhu, yang menyebabkan aktifitas ion dan resistansi pada lingkungan berubah, begitu juga sama halnya dengan grafik hasil pengujian pada air kapur. Rata-rata arus perlindungan yang diberikan pada logam di lingkungan air cuka adalah sebesar 5,951 mA, dan pada logam di lingkungan air kapur sebesar 5,694 mA.

Melihat besarnya arus yang secara otomatis diberikan selama pengujian sistem, baik pada lingkungan air ledeng maupun pada lingkungan air laut, menunjukkan bahwa nilai tersebut lebih mendekati nilai kebutuhan arus yang telah dihitung sebelumnya yaitu 5,5952 mA, dan jauh lebih besar dari nilai kebutuhan arus yang telah dicari yaitu 3 mA. Hal tersebut tidak menjadi masalah selama logam masih bisa terlindungi dengan baik dan berada pada kriteria proteksi katodik yang telah ditetapkan, dan juga hal tersebut dapat memberikan gambaran efisiensi sistem dalam melindungi logam, dan keakuratan sensor dalam membaca nilai potensial logam terhadap elektroda referensi.