

Sistem Monitoring *Impressed Current Cathodic Protection* Berbasis IoT untuk Lambung Kapal

Among Hukoro¹ dan Muhammad Khosyi'in²

^{1, 2}Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Kaligawe KM 4, Semarang 50112
e-mail: amonghukoro@gmail.com

Abstrak— Korosi menyebabkan kerugian ekonomi signifikan, terutama di industri pelayaran, sehingga pengendalian korosi menjadi prioritas. Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mempermudah manajemen korosi. Sistem ini mengukur tegangan Referensi Cell Zinc, tegangan dan arus Anode, Suhu air, serta lokasi GPS. Pengujian dilakukan pada tiga sampel besi dengan kondisi *Under Protection*, *Protection*, dan *Over Protection* di air tawar dan air garam. Hasil penelitian ini berhasil merancang sistem monitoring ICCP untuk kapal berbasis IoT, sistem mampu memantau korosi secara *real-time*, dengan efektivitas tinggi di air garam, sistem mendeteksi korosi pada rentang 352 hingga 262 mV, perlindungan pada -23 hingga 23 mV, dan *hydrogen embrittlement* pada -129 hingga -145 mV. Di air tawar, sistem menunjukkan ketidaksesuaian pengukuran, di mana besi terkorosi terdeteksi *Protection* dan besi terlindungi terdeteksi *Over Protection*. Keakuratan pengukuran Ref.Cell mencapai 97,4% untuk rentang 352 hingga 262 mV, namun menurun menjadi 69% di rentang -35 hingga 47 mV. Tegangan dan arus anode memiliki akurasi tinggi 92% dan 98% jika mengukur lebih dari 0,5 V dan 1 mA, sementara rata-rata jarak *error* GPS terhitung 5,8 meter dan pengukuran suhu pada kondisi ruang menunjukkan hasil presisi dan akurat.

Kata kunci: Korosi, Proteksi Katodik, ICCP, Kapal, GPS

Abstract— Corrosion causes significant economic losses, particularly in the maritime industry, making corrosion control a priority. This study developed a monitoring system for *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) integrated with the *Internet of Things* (IoT) to simplify corrosion management. The system measures Zinc Reference Cell voltage, Anode voltage and current, water Temperature, and GPS location. Testing was conducted on three iron samples under conditions of *Under Protection*, *Protection*, and *Over Protection* in freshwater and saltwater environments. The research successfully designed an IoT-based ICCP monitoring system for ships, capable of real-time corrosion monitoring with high effectiveness in saltwater, the system detected corrosion within a range of 352 to 262 mV, protection between -23 to 23 mV, and *hydrogen embrittlement* between -129 to -145 mV. In freshwater, the system showed measurement inconsistencies, detecting corroded iron as *Protection* and protected iron as *Over Protection*. The accuracy of Ref.Cell measurements reached 97.4% for the 352 to 262 mV, but dropped to 69% for range -35 to 47 mV. Anode voltage and current measurements showed high accuracy 92% and 98% if values above 0.5 V and 1 mA, meanwhile the average GPS error distance was calculated is 5,8 meters, and temperature measurements under room conditions were precise and accurate.

Keywords: Corrosion, Cathodic Protection, ICCP, Ship, GPS

I. PENDAHULUAN

Korosi menyebabkan kerugian ekonomi signifikan di berbagai sektor industri, termasuk pelayaran. Laporan ekonomi Amerika Serikat, kerugian akibat korosi meningkat dari \$82.5 miliar pada tahun 1975 menjadi hampir \$300 miliar per tahun pada 1995. Secara global, biaya korosi meningkat terus mencapai \$2.5 triliun pada 2013, dari penelitian 40% kerugian ini dapat dihindari [1]. Korosi menjadi salah satu penyebab utama kerusakan struktural kapal, seperti kasus haluan patah pada kapal MT.Kirki (1991) dan pelat lambung terlepas pada kapal MT.Tirta Niaga I (2006). Mengurangi risiko korosi, Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) menetapkan aturan mengenai

ketebalan pelat kapal dan mewajibkan inspeksi rutin. Pengendalian korosi pada kapal dengan cara pengecatan (*coating*) dan proteksi katodik, baik dengan metode pengorbanan anode (SACP) maupun arus paksa (ICCP), metode ICCP dinilai lebih efisien secara ekonomi dibanding SACP [2], [3], [4].

Riset mengenai sistem ICCP sebagai pelindung *sea chest* kapal, menunjukkan jika metode SACP memiliki tingkat korosi tinggi yaitu dengan air laut Lamongan 0,5778 *mmpy* sedangkan air laut dari Sidoarjo 0,4287 *mmpy*. Hasil dari metode ICCP dengan tegangan 9 volt laju korosi pada air laut Lamongan 0,1942 *mmpy* sedangkan air laut dari Sidoarjo 0,1340 *mmpy* [5]. Faktor suhu di air laut menunjukkan berbanding lurus dengan laju korosi [6].

Penelitian tentang pembuatan *prototype* monitoring ICCP untuk perlindungan logam Zn, menggunakan mikrokontroler Arduino Uno serta sensor tegangan dan arus ACS712. Sistem ICCP menggunakan sumber listrik dari satu buah baterai (1,5V), percobaan dilakukan selama 165 jam (7 hari) dengan merendam pelat seng dengan ICCP dan pelat seng tanpa ICCP di dalam larutan NaCl. Percobaan ini hanya berfokus pada monitoring nilai tegangan elektrode Ag/AgCl dan arus di *platform* blynk pada perlindungan pelat seng [7].

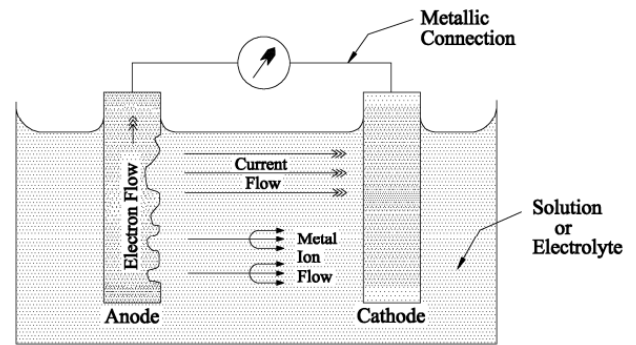
Penelitian tentang pembuatan *prototype* monitoring SACP yang digunakan untuk melindungi logam. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor tegangan, ACS712 dan sistem monitoring dirancang melalui *platform* ThingSpeak. Percobaan dilakukan pada pelat besi dengan SACP dan tanpa SACP yang direndam pada air tawar selama 6 jam dan hanya berfokus pada monitoring nilai tegangan dari elektrode Ag/AgCl melalui *smartphone* [8].

Penelitian mengenai perancangan monitoring ICCP berbasis IoT, dengan memanfaatkan sensor tegangan, sensor arus, mikrokontroler Arduino dan ESP8266 serta menggunakan platform ThingSpeak. Percobaan dilakukan pada pelat besi ukuran 10 x 10 cm tanpa ICCP dan dengan ICCP selama 12 jam yang direndam dengan air cuka. Monitoring ini dapat memberikan indikasi sistem *safe* dan *fail* dengan berfaktor nilai tegangan dari elektrode Ag/AgCl [9], beberapa jenis kapal sistem ICCP implementasinya masih terbatas pada monitoring manual yang kurang praktis dan jarang dilakukan pencatatan data, oleh karena itu, penelitian ini merancang sistem monitoring ICCP untuk lambung kapal berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan elektrode Referensi Zinc yang terintegrasi dengan sensor GPS dan suhu untuk memantau potensi korosi berdasarkan lokasi dan kondisi lingkungan, serta pencatatan data secara otomatis yang bertujuan mempermudah manajemen korosi pada lambung kapal.

II. STUDI PUSTAKA

Korosi ialah terjadinya perpindahan elektron dari logam ke lingkungan sekitar, kata lain logam sebagai pemberi sel elektron (anode), sedangkan lingkungan sekitar menerima elektron (katode). Dalam konstruksi perkapalan korosi ini dapat menimbulkan beberapa kerugian antara lain kerusakan pada permesinan, peralatan, dan struktur dari bangunan kapal itu sendiri. Kerusakan logam atau korosi ini hanya dapat dikendalikan dengan cara memperlambat laju korosinya. Empat syarat terjadinya korosi atau proses elektrokimia (Gambar 1):

1. *Anode*, merupakan tempat mengalami korosi atau kehilangan elektron (reaksi oksidasi).
2. *Katode*, tempat terjadinya reaksi reduksi.
3. *Electrolyte*, kondisi lingkungan seperti larutan yang sifatnya dapat menghantarkan arus listrik.
4. *Arus listrik*, dari anode menuju ke katode (transfer ion logam) [2].

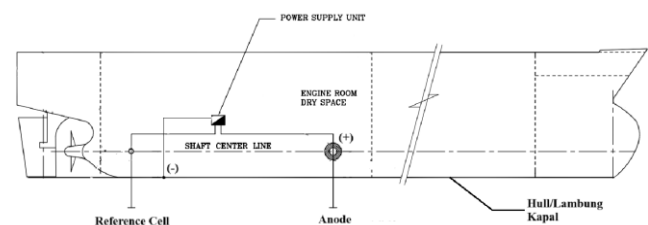


Gambar 1. Proses korosi [10]

A. Proteksi Katodik (ICCP)

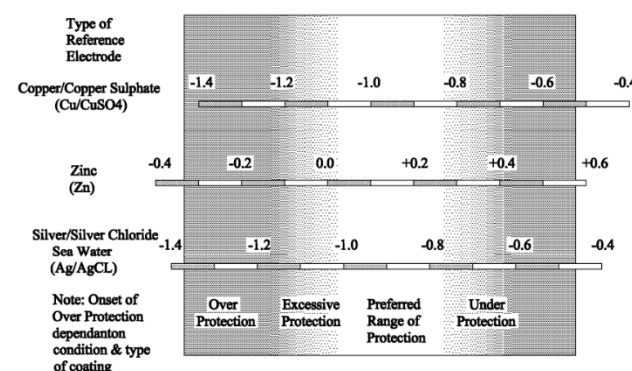
Penerapan metode ICCP pada Gambar 2 memiliki komponen sebagai berikut:

1. *Power Supply Unit (PSU)*, Power Supply Unit adalah perangkat yang menghasilkan arus listrik searah (DC).
2. *Anode*, Elektrode yang akan dialiri arus positif dari PSU. Material bahan anode dapat berupa aluminium, MMO/Ti, Iron & steel dll.
3. *Reference Cell*, Elektrode sebagai titik referensi mengukur potensial antara pelat kapal (besi) terhadap lingkungan sekitarnya. Reference Cell untuk air laut bisa terbuat dari Ag/AgCl dan Zn.



Gambar 2. Skema rangkaian sistem ICCP pada kapal [10]

Gambar 3 menunjukkan Ref.Cell Zn mengukur potensial besi kriteria terlindungi pada rentang 0 s.d 250 mV.



Gambar 3. Nilai standar referensi elektrode (Reference Cell) [10]

Penggunaan Ref.Cell sebagai penentu bahwa besi yang akan dilindungi apakah belum mencapai perlindungan (*Under Protection*) atau perlindungan berlebih (*Over Protection*) yang berakibat merusak struktur cat dan terjadi pelapukan karena hidrogen (*hydrogen embrittlement*) [2].

B. Persamaan untuk Analisa

Menentukan laju korosi besi dengan metode *weightloss*:

$$CR = \frac{K \cdot W}{D \cdot A \cdot T} \quad (1)$$

$$w = w_0 - w_t \quad (2)$$

Di mana CR adalah *corrosion rate* (mmpy), K adalah constants $8,76 \cdot 10^4$, W adalah massa yang hilang (gr), D adalah massa jenis baja ($7,85 \text{ gr/cm}^3$), A adalah luas baja (cm^2), T adalah waktu pengujian (jam), w_0 adalah berat awal dan w_t adalah berat akhir [5].

Melindungi lambung kapal dari korosi dibutuhkan arus dari persamaan sebagai berikut:

$$L = 2(p \cdot l) + 2(p \cdot t) + 2(l \cdot t) \quad (3)$$

$$\text{Arus Proteksi} = L (m^2) \cdot 35 (mA/m^2) \quad (4)$$

Di mana L adalah luas baja yang akan dilindungi (m^2), p adalah panjang, l adalah lebar, dan t adalah tinggi atau ketebalan pelat [10].

Pengujian GPS menggunakan metode perhitungan haversine untuk mengubah data desimal derajat ke bentuk jarak (m), persamaan (5) sebagai berikut:

$$d = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (5)$$

Di mana d adalah jarak (km), R adalah jari-jari bumi (6.371 km), ϕ_1 adalah radian latitude titik awal, ϕ_2 adalah radian latitude titik akhir, λ_1 adalah radian longitude titik awal, λ_2 radian longitude titik akhir. 1° merupakan $\frac{\pi}{180}$ radian [11].

Data pengukuran dilakukan analisis statistik dari persamaan berikut [12],

Mencari persentase *error*:

$$\text{Error} (\%) = \left| \frac{\text{Nilai diketahui} - \text{Nilai terukur}}{\text{Nilai diketahui}} \right| \cdot 100 \quad (6)$$

Mencari rata-rata (Avg):

$$\bar{x} = \frac{\text{Jumlah data}}{\text{Banyaknya data}} \quad (7)$$

Mencari deviasi absolut rata-rata, untuk menentukan presisi pengukuran:

$$\frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{N} \quad (8)$$

Mencari akurasi:

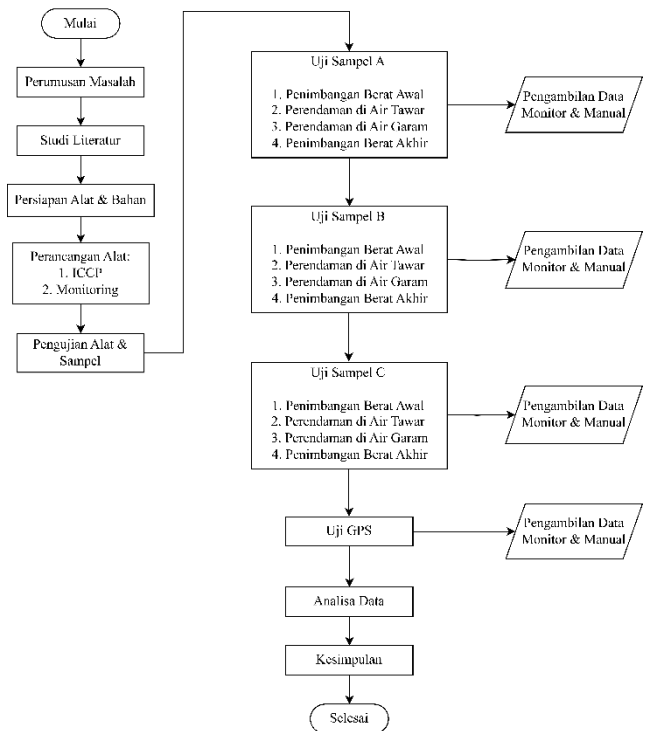
$$\text{Akurasi} (\%) = 100\% - \text{Error} (\%) \quad (10)$$

III. METODE

Pengujian alat sistem monitoring ICCP dilakukan terhadap tiga keadaan atau tiga sampel yang berbeda:

1. *Sampel A*, *Under Protection* (tanpa ICCP),
2. *Sampel B*, monitor dijaga dalam status *Protection*,
3. *Sampel C*, *Over Protection* (ICCP 30 mA).

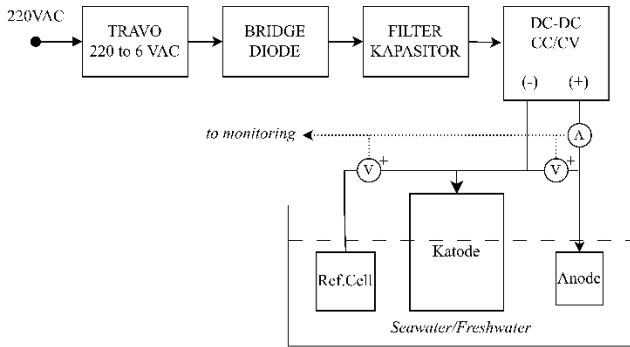
Ketiga sampel direndam dalam air menggunakan wadah berukuran $16 \times 16 \times 7 \text{ cm}$. Pengujian dilakukan dengan merendam sampel di air tawar dan air garam. Pengujian ketiga sampel dengan jenis media air yang berbeda bertujuan mengetahui respon alat terhadap variabel lingkungan, sampel direndam 24 jam dengan pengambilan data dilakukan setiap jam 8, 12, 16, dan 20, (12 jam) di mana setiap jam pengukuran diulang sebanyak tiga kali. Pergantian sampel, pergantian media air dari air tawar ke air garam, dan pengukuran pertama dilakukan pada jam 8, untuk GPS akan dilakukan pengujian dengan empat titik lokasi yang berbeda, dilakukan terpisah atau setelah selesai pengujian ketiga sampel pelat besi. Pengambilan data bersumber dari pembacaan Monitoring dan akan dibandingkan dengan data Referensi dari pengukuran manual. Alur tahapan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Flowchart sistematis metode penelitian

A. Perancangan Sistem ICCP

Rangkaian pertama merupakan rangkaian PSU yang merupakan rangkaian dasar dari *rectifier* [13], [14]. Aplikasinya terhadap sistem ICCP untuk anode (+) dan katode (-) sebagai struktur yang akan dilindungi, keluaran dari kapasitor berupa tegangan 6 VDC yang digunakan sebagai input *Buck Converter* (DC-DC CC/CV) supaya tegangan dan arus dapat diatur menyesuaikan lingkungan sehingga pelat besi (katode) terhindar dari *Over* maupun *Under Protection*. Blok diagram sistem ICCP ditunjukkan pada Gambar 5.



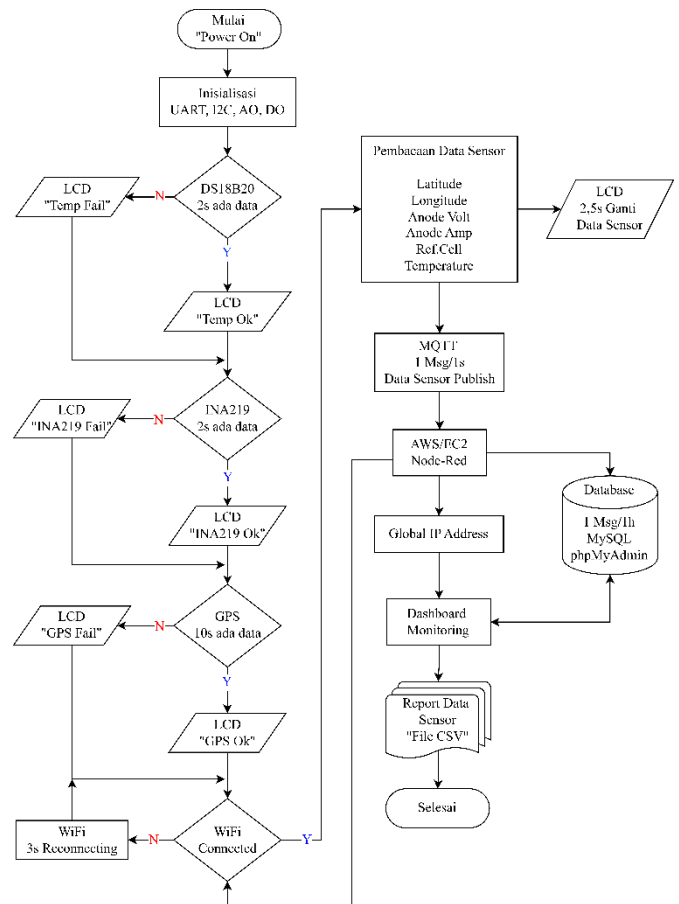
Gambar 5. Blok diagram sistem ICCP

B. Perancangan Monitoring ICCP

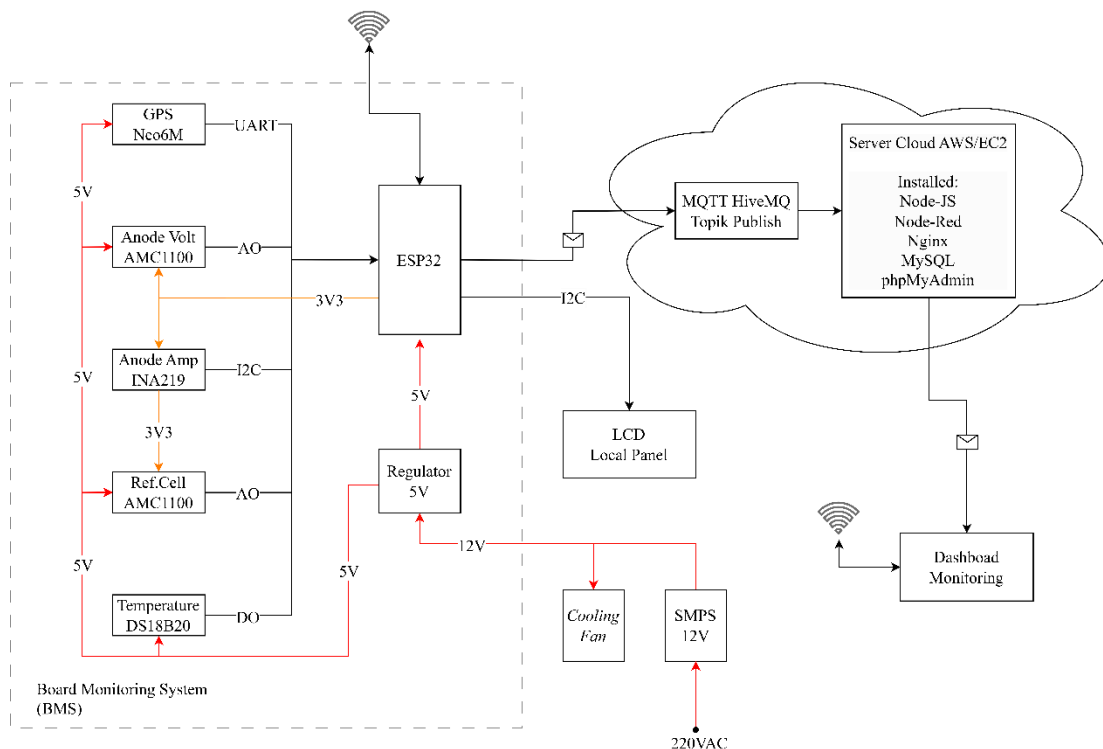
Monitoring ICCP dilakukan dengan membuat rangkaian PCB yang dinamai *Board Monitoring System* (BMS) seperti pada Gambar 6, yang didasari menggunakan mikrokontroler ESP32 [15]. BMS akan memproses data sensor meliputi tegangan Ref.Cell, tegangan dan arus anode dari AMC1100 dan INA219, GPS NEO6MV2, serta suhu DS18B20 untuk dipublish ke broker MQTT HiveMQ [16], [17], [18]. Penggunaan IC AMC110 digunakan sebagai sensor tegangan Ref.Cell karena mampu membaca tegangan dari -250 sampai +250 mV melalui input VINP maupun VINN [19], hal ini sangat berfungsi sebagai pembacaan tegangan elektrode Reference Cell yang rentang kecil (mV).

Gambar 7 menunjukkan *flowchart* sistem monitoring ICCP, ketika power input ON, BMS menginisialisasi perangkat yang terhubung (UART untuk GPS, I2C untuk INA219 & LCD, AO untuk Anode Volt & Ref.Cell, DO untuk DS18B20). Sensor mengecek data dari DS18B20 dan INA219 (2 detik) serta GPS (10 detik); jika tidak ada data, LCD menampilkan "Fail". Data sensor dipublikasikan ke broker MQTT setiap detik, dengan syarat BMS terhubung ke internet (WiFi); jika tidak, sistem akan mencoba

menghubungkan ulang. Database menyimpan 1 pesan per jam, dan "Dashboard Monitoring" dapat mengunduh atau menghapus data logger dalam format CSV yang tersimpan di database.



Gambar 7. Flowchart sistem monitoring ICCP



Gambar 6. Blok diagram alat monitoring ICCP

C. Perancangan Software

Berikut beberapa rangkaian *software* untuk membuat sistem ICCP terintegrasi dengan *Internet of Things*:

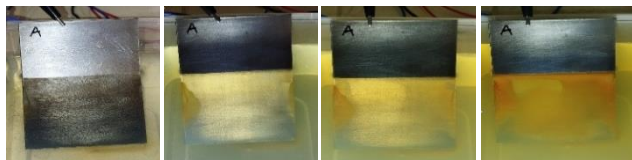
1. *Altium Designer*, digunakan untuk mendesain PCB dari BMS.
2. *Arduino IDE*, ESP32 diprogram menggunakan *software Arduino IDE* supaya dapat memproses data sensor.
3. *Amazon Elastic Coompute Cloud (EC2)*, digunakan sebagai server virtual (*Cloud*), supaya memiliki IP Publik.
4. *PutTTY*, digunakan untuk mengakses dan mengelola server (*Cloud*) secara *remote* melalui jaringan SSH (*Secure Shell*),
5. *Node-Red*, digunakan untuk mendesain tampilan monitoring.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Sampel

1. Under Protection Sampel A di Air Tawar

Hasilnya sampel terkorosi tetapi pengukuran Ref.Cell tidak sesuai yakni menurun 243 hingga 8,8 mV (*Protection*).



(a). 0 jam (b). 4 jam (c). 8 jam (d). 12 jam

Gambar 8. Pengujian sampel A di air tawar selama 12 jam

Tabel 1. Hasil Pengukuran sampel A di air tawar selama 12 jam

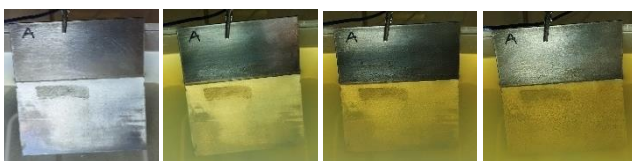
Sampel A (Air Tawar)	Simbol	Pengukuran Jam											
		8			12			16			20		
Monitor	mV	235	247	247	243	141	188	141	157	70	70	82	74
Ref.Cell	Ref	235	250	240	242	130	180	157	156	75	75	88	79.3
Error	%	0.0	1.2	2.9	0.6	8.5	4.4	10.2	0.6	6.7	6.7	6.9	7.3
Monitor	°C	27.7	27.7	27.7	27.7	27.5	27.5	27.5	28.2	28.2	28.2	28.2	28.5
Temp	Ref	27.6	27.6	27.6	27.6	27.5	27.4	27.5	27.5	28.2	28.2	28.1	28.2
Error	%	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	0.4

Tabel 2. Hasil perhitungan deviasi rata-rata dan akurasi dari pengukuran sampel A di air tawar

Sampel A (Air Tawar)	Simbol	Deviasi Rata - Rata dan Akurasi											
		8			12			16			20		
Ref.Cell	Deviasi	8	4	4	15.7	31.3	15.7	4	4	8	3.2	14.4	18
	Akurasi	100	98.8	97.1	91.5	95.6	89.8	93.3	93.3	93.2	92.7	64.7	90.0
Temp	Deviasi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Akurasi	99.6	99.6	99.6	100	99.6	100	100	99.6	99.6	99.6	99.6	99.8%

2. Under Protection Sampel A di Air Garam

Hasilnya pengukuran Ref.Cell dengan mengacu Gambar 3 [10], sesuai dengan yang terjadi terhadap sampel yang terkorosi yakni 352 hingga 262 mV (Tabel 3).



(a). 0 jam (b). 4 jam (c). 8 jam (d). 12 jam

Gambar 9. Pengujian sampel A di air garam selama 12 jam

Tabel 3. Hasil Pengukuran sampel A di air garam selama 12 jam

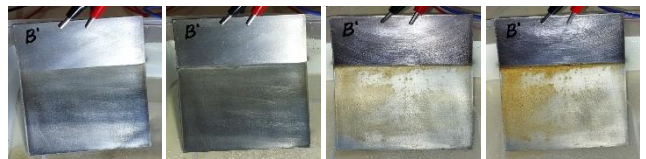
Sampel A (Air Garam)	Simbol	Pengukuran Jam											
		8			12			16			20		
Monitor	mV	352	352	352	352	282	270	270	274	282	305	294	258
Ref.Cell	Ref	359	351	351	354	283	278	280	300	301	299	300	278
Error	%	1.9	0.3	0.3	0.5	0.4	2.9	2.9	2.0	6.0	1.3	1.7	2.1
Monitor	°C	29.1	29.1	29.1	29	28.7	28.7	28.7	28.7	27.7	27.7	27.7	26.8
Temp	Ref	29.1	29.1	29.1	29	28.6	28.7	28.7	28.7	27.7	27.7	27.7	26.8
Error	%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4

Tabel 4. Hasil perhitungan deviasi rata-rata dan akurasi dari pengukuran sampel A di air garam

Sampel A (Seawater)	Simbol	Deviasi Rata - Rata dan Akurasi											
		8			12			16			20		
Ref.Cell	Deviasi	0	0	0	8.0	4	4	11.7	11	0.33	4	4	8
	Akurasi	98.1	99.7	99.7	99.6	97.1	97.1	94	98.7	98.3	92.8	94.5	98.9
Temp	Deviasi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Akurasi	100	100	100	99.7	100	100	100	100	100	99.6	99.6	99.9%

3. Protection Sampel B di Air Tawar

Terlihat sampel (d) yang dekat dengan anode lebih mudah terlindungi dan rata-rata arus ICCP 0,82 hingga 0,75 mA, hal ini karena sifat resistansi air tawar yang tinggi, membatasi pembubaran arus listrik.



(a). 0 jam (b). 4 jam (c). 8 jam (d). 12 jam

Gambar 10. Pengujian sampel B di air tawar selama 12 jam

Tabel 5. Hasil Pengukuran sampel B di air tawar selama 12 jam

Sampel B (Air Tawar)	Simbol	Pengukuran Jam											
		8			12			16			20		
Monitor	V	0.67	0.66	0.69	0.67	0.4	0.43	0.42	0.42	0.41	0.4	0.41	0.49
V Anode	Ref	0.75	0.75	0.75	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.49	0.49	0.49	0.56
Error	%	10.7	12	8	10.2	20	14	16	16.7	16.3	18.4	16.3	17
Monitor	mA	0.75	0.85	0.85	0.82	0.53	0.43	0.43	0.46	0.64	0.53	0.53	0.57
I Anode	Ref	1	1	1	1	0.63	0.62	0.62	0.62	0.78	0.78	0.78	0.78
Error	%	25	15	15	18.3	15.9	30.6	30.6	25.7	17.9	32.1	32.1	27.4
Monitor	mV	-9	-23	-11	-14.3	-23	-9	-9	-13.7	-9	-23	-11	-14.3
Ref.Cell	Ref	-10	-29	-20	-19.7	-20	-8	-10	-12.7	-7	-26	-15	-16
Error	%	10	20.7	45	27.1	15	12.5	10	7.9	28.6	11.5	26.7	10.4
Monitor	°C	28.9	28.9	28.9	28.9	28.3	28.3	28.3	28.3	28.5	28.5	28.5	28.5
Temp	Ref	28.9	28.9	28.9	28.9	28.3	28.3	28.3	28.3	28.5	28.5	28.5	28.5
Error	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 6. Hasil perhitungan deviasi rata-rata dan akurasi dari pengukuran sampel B di air tawar

Sampel B (Air Tawar)	Simbol	Deviasi Rata - Rata dan Akurasi											
		8			12			16			20		
V Anode	Deviasi	0	0.01	0.02	0.02	0.01	0	0	0.01	0	0	0.01	0.01
	Akurasi	89	88	92	80.0	86.0	84.0	83.7	81.6	83.7	87.5	85.7	89.3
I Anode	Deviasi	0.07	0.03	0.03	0.1	0.03	0.03	0.07	0.04	0.04	0	0	0.03
	Akurasi	75	85	85	84.1	69.4	69.4	82.1	67.9	67.9	79.8	79.8	77%
Ref.Cell	Deviasi	5.3	8.7	3.3	9.3	4.7	4.7	5.3	9	3.3	0	12	12
	Akurasi	90	79	55	85.0	87.5	90.0	71.4	88.5	73.3	100	90.6	94.9
Temp	Deviasi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Akurasi	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100%

4. Protection Sampel B di Air Garam

Hasilnya keseluruhan sampel dapat terlindungi dengan rata-rata arus 2 mA dan pengukuran Ref.Cell Tabel 7 sesuai dengan standar teknis Gambar 3 [10] yakni -23 hingga 23 mV.



(a). 0 jam (b). 4 jam (c). 8 jam (d). 12 jam

Gambar 11. Pengujian sampel B di air garam selama 12 jam

Tabel 7. Hasil Pengukuran sampel B di air garam selama 12 jam

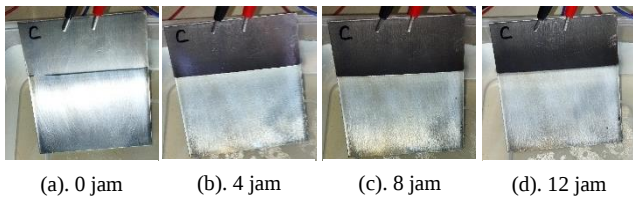
Sampel B (Air Garam)	Simbol	Pengukuran Jam											
		8			12			16			20		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Monitor V	V	0.12	0.1	0.11	0.11	0.07	0.09	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.09
V Anode Ref	V	0.19	0.19	0.19	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14
Error	%	36.8	47.4	42.1	42.1	53.3	40	46.7	46.7	53.3	51.1	42.9	35.7
Monitor mA	mA	3.1	2.9	3.1	3.03	2.1	2	2.1	2.07	2.1	2	2.07	2
I Anode Ref	mA	3.1	3.1	3.1	3.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Error	%	0	6.5	0	2.2	0	4.8	0	1.6	0	0	4.8	0
Monitor mV	mV	-23	-11	-35	-23	11	11	11	11	35	47	23	23
Ref.Cell Ref	mV	-23	-29	-27	-26.3	15	14	16	15	31	30	30.3	21
Error	%	0	62.1	29.6	12.7	26.7	21.4	31.3	26.7	12.9	56.7	23.3	15.4
Monitor °C	°C	29	29.1	29	29	27.9	27.8	27.9	27.9	28.9	28.9	28.9	29
Temp Ref	°C	29.1	29.1	29.1	29.1	27.8	27.8	27.8	27.8	28.8	28.8	28.8	28.9
Error	%	0.3	0.0	0.3	0.2	0.4	0.0	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3

Tabel 8. Hasil perhitungan deviasi rata-rata dan akurasi dari pengukuran sampel B di air garam

Sampel B (Air Garam)		Deviasi Rata - Rata dan Akurasi											
		8			12			16			20		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
V Anode	Deviasi	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0.01
	Akurasi	63	53	58	46.7	60.0	53.3	46.7	57.1	57.1	64.3	55%	55%
I Anode	Deviasi	0.07	0.13	0.07	0.03	0.07	0.03	0.03	0.03	0.07	0.03	0.07	0.03
	Akurasi	100	94	100	100	95	100	100	95	95	100	95	98%
Ref.Cell	Deviasi	0	12	12	0	0	0	0	12	12	12	0	6
	Akurasi	100	38	70	73.3	78.6	68.8	87.1	43.3	76.7	52.4	40.9	95.5
Temp	Deviasi	0	0.07	0	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0.0
	Akurasi	99.7	100	99.7	99.6	100	99.6	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7%

5. Over Protection Sampel C di Air Tawar

Sifat resistansi air tawar yang tinggi membuat arus 30 mA menurun menjadi rata-rata 1,7 mA, sehingga membuat keseluruhan sampel terlindungi. Pengukuran Ref.Cell pada Tabel 9 menunjukkan *Over Protection* (-290 hingga -235 mv) tetapi tidak terjadi pembentukan hidrogen, dan hasilnya tidak sesuai dengan standar teknis Gambar 3 [10].



Gambar 12. Pengujian sampel C di air tawar selama 12 jam

Tabel 9. Hasil Pengukuran sampel C di air tawar selama 12 jam

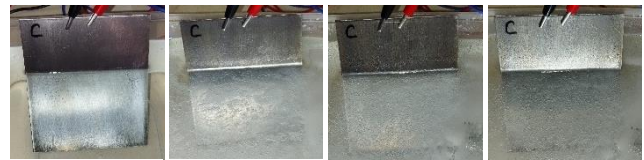
Sampel C (Air Tawar)	Simbol	Pengukuran Jam											
		8			12			16			20		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Monitor V	V	1.05	1.07	1.06	1.06	1.07	1.07	1.09	1.08	1.09	1.09	1.08	1.1
V Anode Ref	V	1.17	1.17	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.17	1.17
Error	%	10.3	8.5	9.4	9.4	9.3	8.5	9.3	9.0	7.6	7.9	7.7	8.5
Monitor mA	mA	2	1.9	2	1.97	1.7	1.8	1.8	1.7	1.8	1.7	1.8	1.7
I Anode Ref	mA	2	2	2	1.84	1.84	1.84	1.82	1.82	1.82	1.88	1.88	1.88
Error	%	0	5	0	1.7	7.6	2.2	2.2	7.6	1.1	1.1	6.6	4.3
Monitor mV	mV	-294	-282	-294	-290	-235	-247	-211	-231	-247	-270	-223	-247
Ref.Cell Ref	mV	-300	-310	-308	-306	-230	-250	-224	-235	-245	-275	-282	-267
Error	%	2	9.0	4.5	5.2	2.2	1.2	5.8	1.6	0.8	1.8	4.3	1.1
Monitor °C	°C	29.3	29.3	29.3	29.3	28.4	28.4	28.4	28.4	28.8	28.8	28.8	28.7
Temp Ref	°C	29.3	29.3	29.3	29.3	28.4	28.4	28.4	28.4	28.8	28.8	28.8	28.6
Error	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3

Tabel 10. Hasil perhitungan deviasi rata-rata dan akurasi dari pengukuran sampel C di air tawar

Sampel C (Air Tawar)		Deviasi Rata - Rata dan Akurasi											
		8			12			16			20		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
V Anode	Deviasi	0.01	0.01	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0	0.01	0.02
	Akurasi	90	91	91	90.7	91.5	90.7	92.4	91.5	92.4	92.3	91.5	94.0
I Anode	Deviasi	0.03	0.07	0.03	0	0.1	0.1	0.1	0	0.03	0.07	0.03	0.06
	Akurasi	100	95	100	92.4	97.8	98.9	98.9	93.4	95.7	90.4	95.7	96%
Ref.Cell	Deviasi	4	8	4	4	16	20	23.3	0	23.7	12.0	12	0
	Akurasi	98	91	95	97.8	98.8	94.2	99.2	98.2	95.7	94	97.1	91.8
Temp	Deviasi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Akurasi	100	100	100	100	100	100	100	100	99.7	99.7	99.7	100%

6. Over Protection Sampel C di Air Garam

Hasilnya sampel mengalami *hydrogen embrittlement*, Tabel 11 menunjukkan Ref.Cell -129 hingga -145 yang artinya sesuai dengan standar teknis Gambar 3 [10]. Selain itu arus 30 mA membuat reaktivitas anode meningkat, yang berakibat korosi anode (Gambar 14).



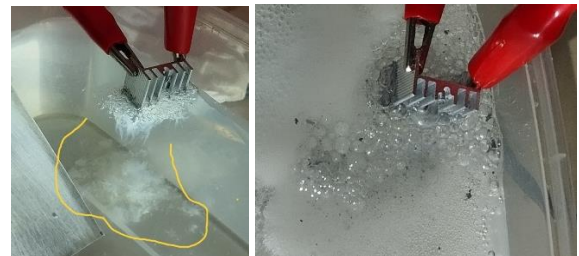
Gambar 13. Pengujian sampel C di air garam selama 12 jam

Tabel 11. Hasil Pengukuran sampel C di air garam selama 12 jam

Sampel C (Air Garam)	Simbol	Pengukuran Jam											
		8			12			16			20		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Monitor V	V	0.27	0.27	0.24	0.26	0.29	0.31	0.31	0.3	0.29	0.28	0.29	0.27
V Anode Ref	V	0.35	0.35	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.37
Error	%	22.9	22.9	31.4	25.7	19.4	13.9	13.9	15.7	19.4	22.2	19.4	20.4
Monitor mA	mA	23.4	23.2	23.4	23.3	23.5	23.6	23.5	23.5	24.3	24.2	24.3	24.1
I Anode Ref	mA	21.6	21.5	21.6	21.6	21.8	21.8	21.8	21.8	22.5	22.2	22.3	22.1
Error	%	8.3	7.9	8.3	8.2	7.8	8.3	7.8	8.0	8	9.0	9.0	8.7
Monitor mV	mV	-117	-129	-141	-129	-117	-129	-117	-121	-117	-129	-121	-152
Ref.Cell Ref	mV	-125	-124	-125	-125	-113	-115	-120	-116	-120	-123	-131	-125
Error	%	6.4	4.0	12.8	3.5	3.5	12.2	2.5	4.3	2.5	4.9	1.5	2.9
Monitor °C	°C	28.5	28.5	28.5	28.5	28.6	28.6	28.6	28.6	29.3	29.3	29.3	29.3
Temp Ref	°C	28.5	28.5	28.5	28.5	28.6	28.6	28.6	28.6	29.3	29.3	29.3	29.3
Error	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 12. Hasil perhitungan deviasi rata-rata dan akurasi dari pengukuran sampel C di air garam

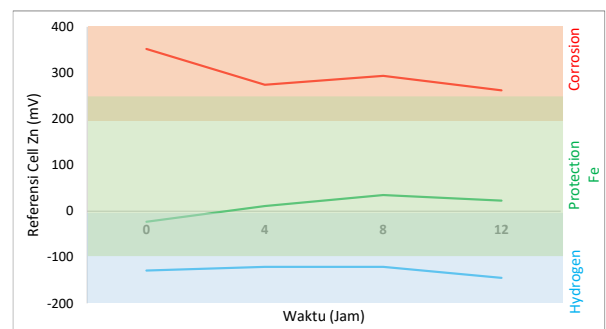
Sampel C (Air Garam)		Deviasi Rata - Rata dan Akurasi											
		8			12			16			20		
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
V Anode	Deviasi	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0	0.01	0.01	0
	Akurasi	77	77	69	80.6	86.1	86.1	80.6	77.8	80.6	73.0	78.4	75.7
I Anode	Deviasi	0.07	0.13	0.07	0.03	0.07	0.03	0.03	0.07	0.03	0.03	0.03	0.07
	Akurasi	92	92	92	92	92	92	92	91	91	91	90	91
Ref.Cell	Deviasi	12	0	12	4	8	4	4	4	8	7.3	3.7	4
	Akurasi	94	96	87	96.5	87.8	97.5	97.5	95.1	98.5	98.0	94.0	94.6
Temp	Deviasi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Akurasi	100.0	100	100.0	100.0	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0%



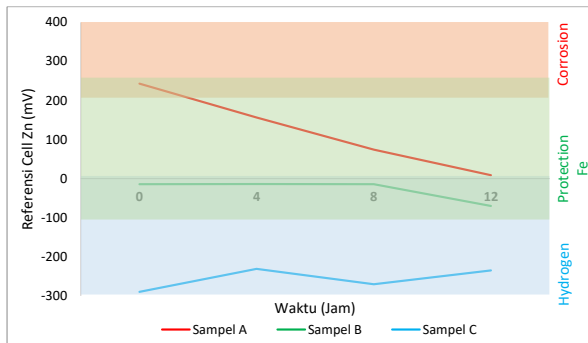
Gambar 14. Korosi anode

7. Karakteristik Pengukuran Ref.Cell

Berdasarkan hasil pengujian sampel dan mengacu pada Gambar 3 sebagai standar teknis pengukuran Ref.Cell [10], hasil monitoring Ref.Cell pada Gambar 15 menunjukkan kesesuaian dengan uji sampel yang direndam dalam air garam. Sebaliknya, pada Gambar 16 yang menggunakan air tawar, terjadi ketidaksesuaian antara monitoring Ref.Cell dengan hasil uji sampel, di mana sampel A terkorosi tetapi sistem monitoring mendeteksi *Protection*, dan sampel C sistem mendeteksi *Over Protection* tetapi tidak terjadi pembentukan hidrogen.



Gambar 15. Grafik monitoring pengukuran Ref.Cell terhadap sampel yang direndam dalam air mengandung garam



Gambar 16. Grafik monitoring pengukuran Ref.Cell terhadap sampel yang direndam dalam air tawar.

8. Laju Korosi

Tabel 13, sampel A menunjukkan laju korosi tertinggi 0,74221 *mmpy* dibanding sampel lainnya.

$$L = 2(p \cdot l) + 2(p \cdot t) + 2(l \cdot t)$$

$$L = 2(10 \cdot 8) + 2(10 \cdot 0.8) + 2(8 \cdot 0.08)$$

$$L = 162.88 \text{ cm}^2$$

$$w = w_0 - w_t$$

$$w = 59.33 - 59.2$$

$$w = 0.13 \text{ g}$$

$$CR = \frac{K \cdot W}{D \cdot A \cdot T}$$

$$CR = \frac{(8.76 \cdot 10^4) \cdot 0.13}{7.85 \cdot 162.88 \cdot 12}$$

$$CR = 0.74221 \text{ mmpy}$$

Tabel 13. Laju korosi setelah pengujian sampel

Sampel Uji	Luas L (cm^2)	Berat Awal w_0 (g)	Berat Akhir w_t (g)	Weight loss w (g)	Corrosion Rate CR (mmpy)
A (Under Protection)	162.88	59.33	59.2	0.13	0.74221
B (Protection)	162.88	59.62	59.6	0.02	0.11419
C (Over Protection)	162.88	59.04	59	0.04	0.22837

9. Pengujian GPS NEO-6MV2

Tabel 14, perhitungan haversine menunjukkan selisih antara GPS monitoring dengan GPS aplikasi *handphone* (Ref) rata-rata adalah 5,8 meter.

Monitoring:

$$\phi_1 = -7.30464733^\circ \cdot \frac{\pi}{180} = -0.127490147 \text{ radian}$$

$$\lambda_1 = 112.8096277^\circ \cdot \frac{\pi}{180} = 1.968899431 \text{ radian}$$

Ref:

$$\phi_2 = -7.304639^\circ \cdot \frac{\pi}{180} = -0.127490001 \text{ radian}$$

$$\lambda_2 = 112.809586^\circ \cdot \frac{\pi}{180} = 1.968898704 \text{ radian}$$

$$d = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

$$d = 0.0047 \text{ km} = 4.7 \text{ m}$$

Tabel 14. Hasil pengujian sensor GPS NEO-6MV2

Lokasi	Monitoring		Ref		Selisih Jarak (m)	
	Lat°	Lon°	Lat°	Lon°		
1	1st	-7.30464733	112.8096277	-7.304639	112.809586	4.7
	2nd	-7.3046385	112.8096318	-7.304618	112.809603	3.9
	3rd	-7.30463317	112.8096438	-7.304610	112.809596	5.9
2	1st	-7.32729133	112.7756822	-7.327403	112.775653	12.8
	2nd	-7.32735683	112.7756512	-7.327412	112.775645	6.2
	3rd	-7.32739117	112.775604	-7.327413	112.775649	5.5
3	1st	-7.30561333	112.8079122	-7.305606	112.807981	7.6
	2nd	-7.305635	112.8079125	-7.305608	112.807982	8.2
	3rd	-7.30563117	112.8079078	-7.305607	112.807981	8.5
4	1st	-7.30505083	112.8093372	-7.305050	112.809360	2.5
	2nd	-7.30506117	112.8093435	-7.305049	112.809356	1.9
	3rd	-7.305062	112.809351	-7.305047	112.809355	1.7
Rata-rata kesalahan jarak GPS						5.8

10. Spesifikasi Sistem ICCP

Arus listrik untuk melindungi pelat lambung kapal diperlukan minimum 35 mA/m^2 [10], maka untuk sampel dengan luas 162,88 cm^2 minimum arusnya:

$$\text{Luas (m}^2\text{)} = \frac{162.88}{10000} = 0.016288 \text{ m}^2$$

$$\text{Arus Proteksi} = \text{Luas Baja (m}^2\text{)} \cdot 35 \text{ (mA/m}^2\text{)}$$

$$\text{Arus Proteksi} = 0.016288 \cdot 35 = 0.57 \text{ mA}$$

Berdasarkan hasil percobaan *Protection* sampel B di air garam, didapati nilai maksimumnya sebesar rata-rata 2 mA, hal ini dikarenakan hasil pengukuran Ref.Cell (Gambar grafik 15) menunjukkan sudah mendekati nilai negatif, jika nilai semakin negatif maka potensi pembentukan hidrogen semakin tinggi. PSU ICCP memiliki arus maksimal 1 A, dengan memperhatikan faktor efisiensi 80% [20], maka dapat melindungi permukaan besi seluas:

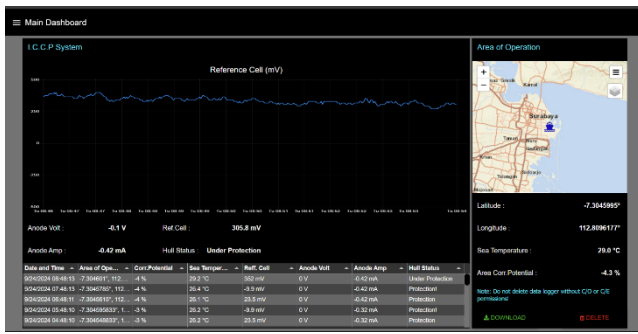
$$\text{Arus Proteksi} = 1 \text{ A} \cdot 0.8 = 0.8 \text{ A} = 800 \text{ mA}$$

$$\text{Luas Baja (m}^2\text{)} = \frac{\text{Arus Proteksi}}{35 \text{ (mA/m}^2\text{)}}$$

$$\text{Luas Baja (m}^2\text{)} = \frac{800}{35} = 22.8 \text{ m}^2$$

Perhitungan ini digunakan untuk sifat lingkungan yang konduktivitasnya tinggi (air laut), perbedaan sifat konduktivitas lingkungan akan mempengaruhi nilai kebutuhan arus.

11. Gambar Monitoring dan File CSV



Gambar 17. Tampilan monitoring ICCP

Date	Lat	Lng	Percentage	Sea Temp	Ref. Cell	Anode Volt	Anode Amp	Hull Status
9/24/2024 16:48:18	-7.304620167	112.8096114	-4%	29 °C	270 mV	0 V	-0.42 mA	Under Protection
9/24/2024 17:48:18	-7.3045965	112.8096392	-3%	29 °C	270 mV	-0.1 V	-0.32 mA	Under Protection
9/24/2024 18:58:49	-7.3045265	112.8096005	-3%	27.8 °C	294 mV	0 V	-0.32 mA	Under Protection
9/24/2024 20:02:31	-7.304543667	112.8097027	-2%	27.1 °C	270 mV	0 V	-0.21 mA	Under Protection
9/24/2024 21:02:32	-7.304557167	112.8096515	-4%	27 °C	258 mV	0 V	-0.42 mA	Under Protection
9/24/2024 22:02:33	-7.304558333	112.809662	-4%	27.3 °C	329 mV	0 V	-0.42 mA	Under Protection
9/24/2024 23:02:34	-7.304559	112.8096627	-4%	26.7 °C	258 mV	0 V	-0.42 mA	Under Protection
9/29/2024 02:04:15	-7.304597167	112.8096227	21%	27 °C	23.5 mV	0.03 V	2.139 mA	Protection
9/29/2024 03:04:15	-7.304574833	112.8096333	20%	27.2 °C	23.5 mV	0.04 V	2.032 mA	Protection
9/29/2024 04:04:16	-7.304582667	112.8096443	20%	27.2 °C	35.2 mV	0.05 V	2.032 mA	Protection
9/29/2024 05:04:16	-7.3045715	112.8096272	21%	27.2 °C	23.5 mV	0.05 V	2.139 mA	Protection
9/29/2024 06:04:18	-7.304576667	112.8096413	21%	26.4 °C	23.5 mV	0.04 V	2.139 mA	Protection
9/29/2024 07:04:18	-7.304603	112.8096437	21%	26.3 °C	23.5 mV	0.05 V	2.139 mA	Protection
9/29/2024 08:04:19	-7.304579167	112.8096377	-3%	26.6 °C	23.5 mV	1.75 V	-0.32 mA	Protection
9/30/2024 11:04:23	-7.304605	112.8096427	234%	28.4 °C	-152 mV	0.29 V	23.42 mA	Over Protection
9/30/2024 12:04:24	-7.304627833	112.8096428	234%	28.5 °C	-141 mV	0.28 V	23.42 mA	Over Protection
9/30/2024 13:04:25	-7.304600333	112.809664	235%	28.6 °C	-117 mV	0.29 V	23.52 mA	Over Protection
9/30/2024 14:04:26	-7.3046355	112.8096452	235%	27.8 °C	-164 mV	0.27 V	23.52 mA	Over Protection
9/30/2024 15:04:26	-7.304620833	112.809624	235%	28 °C	-117 mV	0.25 V	23.52 mA	Over Protection
9/30/2024 16:04:26	-7.304613667	112.809634	236%	28.5 °C	-164 mV	0.27 V	23.63 mA	Over Protection
9/30/2024 17:04:26	-7.304613	112.8096548	235%	28.9 °C	-129 mV	0.27 V	23.52 mA	Over Protection

Gambar 18. Tampilan laporan monitoring ICCP dalam bentuk file CSV

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang sistem monitoring ICCP untuk kapal berbasis IoT yang memungkinkan pemantauan *real-time* terhadap parameter penting seperti tegangan Referensi Cell, tegangan dan arus Anode, GPS, serta suhu. Dalam air garam sistem sesuai dengan standar teknis, mampu mendeteksi korosi rentang 352 hingga 262 mV, terlindungi rentang -23 hingga 23 mV, dan *hydrogen embrittlement* rentang -129 hingga -145 mV. Ketidaksesuaian pengukuran jika berada di air tawar, sampel yang terkorosi tetapi sistem mendeteksi *Protection* dan besi yang terlindungi sistem mendeteksi *Over Protection*.

Keakuratan pengukuran Ref. Cell 97,4% pada rentang 352 hingga 262 mV dan akurasi rendah 69% jika mengukur rentang -35 hingga 47 mV. Tegangan dan Arus Anode akurasi tinggi 92% dan 98% jika pengukuran di atas 0,5V dan 1 mA. Rata-rata jarak *error* GPS terhitung sebesar 5,8 meter, sementara pengukuran suhu pada kondisi ruang menunjukkan hasil yang presisi dan akurat. Metode ICCP kurang optimal dalam mengukur dan melindungi sampel di air tawar, potensi *Over Protection* selain *hydrogen embrittlement* pada katode juga meningkatkan reaktivitas anode.

REFERENSI

- [1] E. Bowman et al., "International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study," 2016.
- [2] P. R. Roberge, Handbook of corrosion engineering. McGraw-Hill, 2000.
- [3] Biro Klasifikasi Indonesia, "Peraturan untuk Klasifikasi dan Konstruksi," 2019.
- [4] H. Soepomo, "Analisa Teknis dan Ekonomis Penggunaan ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) Dibandingkan dengan Sacrificial Anode dalam Proses Pencegahan Korosi," Jurnal Teknik Pomits, vol. 2, 2013.
- [5] A. Wicaksono and D. H. Sutjahji, "Pengaruh Proteksi Katodik Arus Terpasang (ICCP) Sebagai Upaya Pengendalian Laju Korosi Pada Sea Chest Kapal," JPTM, vol. 09, pp. 85–94, 2019.
- [6] Ahmad Royani, "Pengaruh Suhu Terhadap Laju Korosi Baja Karbon Rendah Dalam Media Air Laut," SIMETRIK, vol. 10, pp. 344–349, Dec. 2020.
- [7] D. A. Pratiwi, D. Rahmawati, and D. Faisal Budiman, "Sistem Monitoring Perlindungan Logam Zn Menggunakan Metode Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) Berbasis Internet of Things (IoT)," pp. 162–169, 2022.
- [8] R. F. Raihan, R. K. Bakti, S. Ulyana, D. Rahmawati, and F. Budiman, "Pengembangan Purwarupa Sistem Monitoring dan Proteksi Logam Menggunakan Metode Sacrificial Anode Cathodic Protection Berbasis Internet of Things (IoT)," J Teknol, vol. 11, no. 1, pp. 15–24, Nov. 2023, doi: 10.31479/jtek.v11i1.275.
- [9] V. Fachrizza Sukma, E. Kurniawan, and D. Faisal Budiman, "Sistem Pemantauan dan Perlindungan Korosi Logam Besi dengan Metode Impressed Current Cathodic Protection Berbasis Internet of Things," pp. 154–161, 2022.
- [10] K.C. LTD, Marine I.C.C.P. System For 40K Oil Tanker. Gangseo-gu, Busan 618-220, Korea, 2015.
- [11] M. Khosy'in, S. A. D. Prasetyowati, B. Y. Suprpto, and Z. Nawawi, "The Impact of Telemetry Received Signal Strength of IMU/GNSS Data Transmission on Autonomous Vehicle Navigation," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics, vol. 10, no. 4, pp. 970–982, Dec. 2022, doi: 10.52549/ijeei.v10i4.3901.
- [12] Dr. Benjamin Anderson., "Statorials." Accessed: Sep. 07, 2024. [Online]. Available: <https://statorials.org/id>
- [13] Herry Sudjendro and Widiharso, Elektronika Dasar. 2016.
- [14] Dickson Kho, "Teknik Elektronika." Accessed: Oct. 25, 2024. [Online]. Available: <https://teknikelektronika.com/>
- [15] Electins, "ESP32 DEVKIT V1." Accessed: Apr. 25, 2024. [Online]. Available: <https://electins.id/esp32-devkit-v1/>
- [16] Texas Instruments, INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface. 2015. Accessed: Aug. 13, 2024. [Online]. Available: <https://diyojectsrlab.com/esp32-energy-meter-using-ina219/>
- [17] ublox, "NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet," 2010. Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: www.u-blox.com
- [18] Circuit Schools, "Interfacing DS18B20 Temperature sensor with Arduino, ESP8266 and ESP32." Accessed: May 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.circuitschools.com/interfacing-DS18B20-temperature-sensor-with-arduino-esp8266-esp32/>
- [19] Texas Instruments, AMC1100 Fully-Differential Isolation Amplifier. 2019.
- [20] F. Qiang et al., "Application of transformer heavy load and overload analysis and management system," in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing Ltd, Feb. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/657/1/012097.