



# **Analisis Laju Konsumsi Anoda Korban pada *Water Box* Kondensor PLTGU Tanjung Ugang**

## **Tugas Akhir**

**Oleh:**  
**Nurul Hasanah (4232211004)**

**Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi  
Jurusan Teknik Elektro  
Politeknik Negeri Batam  
2026**

## Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : "Analisis Laju Konsumsi Anoda Korban pada *Water Box* Kondensor PLTGU Tanjung Ugang" adalah hasil karya sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 07 Juli 2026



---

Nurul Hasanah  
NIM: 4232211004

# Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)  
di  
Politeknik Negeri Batam

Oleh:  
Nurul Hasanah (4232211004)

Tanggal Sidang: 07 Juli 2026

Disetujui oleh:

Penguji 1



1. Handri Toar, S.ST., M.Tr.T  
NIK: 113114  
Penguji 2

Pembimbing



1. Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T, M.T  
NIK: 107050



2. Ir. Jhon Hericson Purba, S.Pd., M.Pd  
NIK: 119230

# Lembar Pengesahan Industri

Data Tugas Akhir ini bebas dari plagiasi dan medapat izin untuk disimpan,  
dikelola dan dipublikasikan untuk kepentingan Akademik.

Disusun oleh: Nurul Hasanah (4232211004)

Program Studi: Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi (TRPE)  
Jurusan: Teknik Elektro (Politeknik Negeri Batam)

Judul Tugas Akhir: Analisis Laju Konsumsi Anoda Korban pada *Water Box* Kondensor PLTGU  
Tanjung Uncang

Perusahaan: PT PLN BATAM UNIT PLTGU TANJUNG UNCANG

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing:



Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T, M.T  
NIK: 107050

Pembimbing II



Ghiyathul Samudra  
NIP. 931905204

Manager Unit



Abdullahman  
NIP. 85010941001

# **[Analisis Laju Konsumsi Anoda Korban pada Water Box Kondensor PLTGU Tanjung Uncang]**

## **Abstrak**

Keandalan operasional PLTGU Tanjung Uncang menghadapi tantangan kritis berupa kebocoran pada water box kondensor akibat habisnya anoda korban, di mana strategi pemeliharaan berbasis waktu saat ini dinilai tidak efisien karena menimbulkan risiko forced outage atau pemborosan sumber daya. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model simulasi multi-lapis guna memprediksi laju konsumsi anoda dan merumuskan strategi pemeliharaan prediktif yang optimal. Metode yang diterapkan mengintegrasikan standar industri DNV-RP-B401 dengan prinsip fisika korosi, mencakup Hukum Faraday, persamaan Arrhenius untuk koreksi temperatur, dan model Power-Law untuk pengaruh aliran, yang dieksekusi melalui simulasi Monte Carlo 10.000 iterasi serta analisis keandalan Weibull. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu perairan tropis 30,33°C mempercepat konsumsi anoda sebesar 21,5% dibandingkan standar desain. Analisis keandalan mengonfirmasi mekanisme kegagalan aus (wear-out) dengan parameter bentuk  $\beta = 12,98$ , dengan batas inspeksi kritis pada bulan ke-80 untuk menjaga keandalan 90%. Berdasarkan data lapangan, ditemukan kesenjangan faktor kerusakan coating efektif sebesar 23,8% yang menyebabkan anoda habis 3,8 kali lebih cepat dari desain ideal. Untuk anoda terpasang (Batch 3), sisa umur pakai diprediksi akan habis pada April 2027. Analisis biaya siklus hidup (LCCA) membuktikan bahwa strategi pemeliharaan prediktif menawarkan penghematan sebesar 99,2% dengan rasio biaya 1:118 dibandingkan skenario run-to-failure. Penelitian ini berhasil mentransformasikan anoda korban menjadi "sensor pasif" yang efektif untuk pengambilan keputusan pemeliharaan yang proaktif.

Kata kunci: *Water Box Kondensor, Anoda Korban, Remaining Useful Life (RUL), Simulasi Monte Carlo, Predictive Maintenance*

# **[Analysis of the Sacrificial Anode Consumption Rate in the Condenser Water Box System of Tanjung Uncang PLTGU]**

## **Abstract**

*The operational reliability of Tanjung Uncang Combined Cycle Power Plant (PLTGU) faces a critical challenge in the form of a leak in the condenser water box due to the exhaustion of sacrificial anodes, where the current time-based maintenance strategy is considered inefficient due to the risk of forced outages or waste of resources. This study aims to develop a multi-layer simulation model to predict the anode consumption rate and formulate an optimal predictive maintenance strategy. The applied method integrates the DNV-RP-B401 industry standard with the principles of corrosion physics, including Faraday's Law, the Arrhenius equation for temperature correction, and the Power-Law model for the effect of flow, which are executed through 10,000 iterations of Monte Carlo simulation and Weibull reliability analysis. The results show that tropical water temperature of 30.33°C accelerates anode consumption by 21.5% compared to the design standard. The reliability analysis confirms a wear-out failure mechanism with a shape parameter of  $\beta = 12.98$ , with a critical inspection limit at the 80th month to maintain 90% reliability. Based on field data, a 23.8% gap in the effective coating deterioration factor was found, causing the anodes to wear out 3.8 times faster than the ideal design. For installed anodes (Batch 3), the remaining useful life is predicted to expire in April 2027. A life cycle cost analysis (LCCA) demonstrated that the predictive maintenance strategy offered a 99.2% savings with a cost ratio of 1:118 compared to the run-to-failure scenario. This research successfully transformed the sacrificial anodes into effective "passive sensors" for proactive maintenance decision-making.*

**Keywords:** Water Box Condenser, Sacrificial Anode, Remaining Useful Life (RUL), Monte Carlo Simulation, Predictive Maintenance

## Kata Pengantar

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala rahmat, karunia, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Laju Konsumsi Anoda Korban pada Water Box Kondensor PLTGU Tanjung Uncang". Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat wajib kelulusan pendidikan Sarjana Terapan (S.Tr.T) pada Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Politeknik Negeri Batam.

Selama proses penelitian dan pelaksanaan magang di PT PLN Batam – PLTGU Tanjung Uncang, penulis memperoleh pengalaman berharga yang tidak hanya memperkaya wawasan teknis mengenai operasional pembangkit, tetapi juga membentuk etos kerja di dunia industri yang sesungguhnya. Penulis menyadari bahwa perjalanan ini penuh dengan tantangan, namun berkat dukungan serta bimbingan dari berbagai pihak, segala hambatan tersebut dapat terlampaui dengan baik.

Sebagai bentuk apresiasi dan rasa hormat, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang Tua Tercinta, Ayahanda dan Ibunda, pahlawan di balik setiap pencapaianku. Tahun-tahun ini tidaklah mudah; berjuang di antara seragam kerja dan tugas kuliah adalah perjalanan yang melelahkan. Namun, setiap kali aku merasa ingin berhenti, aku ingat pengorbanan kalian. Terima kasih telah menjadi rumah paling nyaman saat aku pulang dengan sisa tenaga yang nyaris habis. Gelar ini adalah mahkota untuk kalian, bukti bahwa doa-doa tulus kalian telah sampai ke langit. Aku mencintai kalian lebih dari sekadar kata-kata.
2. Widia Imelda, adik kandung penulis, yang selalu menjadi penghibur di kala lelah dan pemberi semangat tambahan untuk menyelesaikan tanggung jawab akademik ini. Terima kasih telah menjadi saudara sekaligus sahabat terbaik.
3. Bapak Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Seminar Proposal dan Tugas Akhir Prodi RPE, atas kesabaran, waktu, dan bimbingan yang sangat berharga dalam mengarahkan penulis.
4. Bapak Handri Toar, S.ST., M.Tr.T., selaku Dosen Penguji 1, dan Bapak Ir. Jhon Hericson Purba, S.Pd., M.Pd selaku Dosen Penguji 2, atas kritik, saran, serta masukan yang membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Arif Budiman (Manajer Unit Pelaksana), Bapak Fandy Mara Sethianda (ASMAN HTU), dan Bapak Darmanto (ASMAN OTU) Unit PLTGU Tanjung Uncang, yang telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk melaksanakan magang industri dan penelitian.

6. Bapak Ghia Alif Santosa, selaku Pembimbing Lapangan di PLTGU Tanjung Uncang, atas kepercayaan, bimbingan teknis, serta pengalaman dunia kerja yang nyata kepada penulis.
7. Tim HAR Unit PLTGU Tanjung Uncang, khususnya Bapak Rafid Fitrianto, Bapak Muhammad Febrianto, Bapak Ahmadsyah, Bapak Juniardi Abdillah, Bapak Yulianto, dan Bapak Yofandra, serta seluruh rekan tim yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas ilmu lapangan yang luar biasa dan kekeluargaan selama penulis berada di lingkungan kerja.
8. Teman-teman seperjuangan di kampus, khususnya Nadia Dila, Lucia Fransiska, dan Retno Ardianti, yang telah memberikan dukungan, semangat, serta keceriaan selama masa perkuliahan hingga kita sampai di tahap ini bersama-sama.
9. Segenap Rekan-Rekan Kerja Praktik, terutama Muhammad Harits Naufal Kurniawan, Inggrit Nilam, Suci Rahmadhani, Bima, Kastu, Dedy, dan Rizky, yang telah menemani, berbagi ilmu, dan berjuang bersama selama masa magang di PLTGU 120 MW Tanjung Uncang.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan baik dalam bentuk doa, motivasi, maupun dukungan lainnya hingga Tugas Akhir ini terselesaikan tepat pada waktunya.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa mendatang. Semoga laporan ini bermanfaat bagi pembaca dan menjadi langkah awal yang bermakna bagi penulis untuk berkontribusi di dunia industri energi.

Batam, 07 Juli 2026



Nurul Hasanah

# Daftar Isi

|                                                                        |      |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| Pernyataan Keaslian Tugas Akhir .....                                  | i    |
| Lembar Pengesahan .....                                                | ii   |
| Lembar Pengesahan Industri .....                                       | iii  |
| Abstrak .....                                                          | iv   |
| <i>Abstract</i> .....                                                  | v    |
| Kata Pengantar .....                                                   | vi   |
| Daftar Isi .....                                                       | viii |
| Daftar Gambar .....                                                    | xi   |
| Daftar Tabel .....                                                     | xii  |
| Bab 1. Pendahuluan .....                                               | 1    |
| 1.1. Latar Belakang .....                                              | 1    |
| 1.2. Rumusan Masalah .....                                             | 2    |
| 1.3. Tujuan .....                                                      | 3    |
| 1.4. Manfaat .....                                                     | 3    |
| 1.5. Batasan .....                                                     | 3    |
| Bab 2. Tinjauan Pustaka .....                                          | 5    |
| 2.1 Konteks Sistem dan Tantangan Degradasi Material .....              | 5    |
| 2.2 Konsep Kunci: "Permintaan Arus" sebagai Indikator Integritas ..... | 8    |
| 2.3 Landasan Teoretis untuk Model Simulasi Konsumsi Anoda .....        | 10   |
| 2.3.1 Justifikasi Model Berbasis Standar (Layer 1) .....               | 10   |
| 2.3.2 Justifikasi Model Berbasis Fisika (Layer 2) .....                | 13   |
| 2.3.3 Justifikasi Model Stokastik (Layer 3) .....                      | 15   |
| 2.4 Landasan Teoretis untuk Kerangka Analisis Prediktif .....          | 16   |
| Bab 3. Metodologi Penelitian .....                                     | 21   |
| 3.1 Kerangka Pikir dan Alur Penelitian .....                           | 21   |
| 3.2 Objek dan Tempat Penelitian .....                                  | 22   |
| 3.3 Pengumpulan Data dan Parameter Model .....                         | 22   |
| 3.3.1 Data Spesifik Proyek (Input Primer) .....                        | 22   |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.2. Parameter Berbasis Literatur dan Standar (Input Sekunder) .....         | 24 |
| 3.4 Tahapan Pengembangan Model Simulasi Multi-Lapis.....                       | 26 |
| 3.4.1 Layer 1: Model Deterministik (Baseline) .....                            | 26 |
| 3.4.2 Layer 2: Model Dinamis Berbasis Fisika .....                             | 26 |
| 3.4.3 Layer 3: Model Stokastik (Simulasi Monte Carlo) .....                    | 27 |
| 3.5 Kerangka Analisis Prediktif dan Perumusan Strategi .....                   | 27 |
| 3.5.1 Analisis Keandalan dan Prediksi RUL .....                                | 27 |
| 3.5.2 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA) .....                                 | 27 |
| 3.6 Perangkat Lunak Penelitian (Tools and Software) .....                      | 27 |
| 3.6.1 Platform Komputasi Utama .....                                           | 28 |
| 3.6.2 Perangkat Lunak Pendukung .....                                          | 28 |
| Bab 4. Hasil dan Pembahasan .....                                              | 29 |
| 4.1 Karakteristik Lingkungan Operasional Kondensor .....                       | 29 |
| 4.1.1 Implikasi Temperatur Tropis terhadap Kinetika Korosi .....               | 29 |
| 4.1.2 Variabilitas Laju Aliran dan Pengaruhnya terhadap Perpindahan Massa..... | 30 |
| 4.1.3 Sintesis: Profil Agresivitas Lingkungan.....                             | 31 |
| 4.2 Simulasi Deterministik Baseline: Benchmark Umur Pakai Ideal ...            | 31 |
| 4.2.1 Fenomena Percepatan Degradasi Non-Linear .....                           | 32 |
| 4.2.2 <i>Coating</i> sebagai Parameter Pengendali Utama .....                  | 33 |
| 4.2.3 Signifikansi TTF 100,1 Bulan .....                                       | 34 |
| 4.3 Model Dinamis Berbasis Fisika: Pengaruh Temperatur dan Aliran              | 34 |
| Aktual                                                                         |    |
| 4.3.1 Dominasi Efek Temperatur Tropis .....                                    | 37 |
| 4.3.2 Netralitas Agregat Faktor Aliran .....                                   | 37 |
| 4.3.3 Interpretasi Perbandingan Kurva Layer 1 dan Layer 2.....                 | 38 |
| 4.3.4 Hierarki Faktor Percepatan Korosi.....                                   | 38 |
| 4.4 Simulasi Monte Carlo dan Analisis Keandalan Weibull .....                  | 39 |
| 4.4.1 Konfigurasi Parameter Stokastik .....                                    | 39 |

|                |                                                                   |    |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4.2          | Contoh Perhitungan: Trace Satu Iterasi Monte Carlo.....           | 40 |
| 4.4.3          | Hasil Simulasi Monte Carlo.....                                   | 41 |
| 4.4.4          | Analisis Keandalan Distribusi Weibull.....                        | 43 |
| 4.4.5          | Sintesis: Kontribusi Tiga Lapis Model .....                       | 45 |
| 4.5            | Analisis Historis: Konfrontasi Model dengan Realitas Lapangan..   | 45 |
| 4.5.1          | Riwayat Penggantian Anoda PLTGU Tanjung Uncang .....              | 46 |
| 4.5.2          | Reverse-Engineering Faktor Kerusakan Coating ( <b>FCO</b> ) ..... | 46 |
| 4.5.3          | Gap Analysis: Kuantifikasi Kesenjangan .....                      | 48 |
| 4.5.4          | Identifikasi Akar Penyebab .....                                  | 49 |
| 4.6            | Estimasi Sisa Umur Pakai Anoda Terpasang (Batch 3).....           | 49 |
| 4.6.1          | Skenario Ideal (Standar DNV, $FC_o = 2\%$ ) .....                 | 49 |
| 4.6.2          | Skenario Aktual (Berbasis Historis Batch 2).....                  | 50 |
| 4.6.3          | Perbandingan Dua Skenario .....                                   | 51 |
| 4.6.4          | Validitas dan Keterbatasan Estimasi.....                          | 51 |
| 4.7            | Analisis Biaya Siklus Hidup dan Rekomendasi Strategi Pemeliharaan | 52 |
| 4.7.1          | Parameter dan Asumsi Biaya.....                                   | 52 |
| 4.7.2          | Analisis LCCA: Preventive vs Run-to-Failure .....                 | 53 |
| 4.7.3          | Interpretasi: Anatomi Biaya Kegagalan .....                       | 55 |
| 4.7.4          | Rekomendasi Strategi Pemeliharaan Prediktif .....                 | 56 |
| BAB 5          | Penutup .....                                                     | 58 |
| 5.1            | Kesimpulan .....                                                  | 58 |
| 5.2            | Saran .....                                                       | 59 |
| 5.2.1          | Saran bagi Perusahaan .....                                       | 59 |
| 5.2.2          | Saran bagi Akademisi.....                                         | 59 |
| 5.2.3          | Saran bagi Peneliti Selanjutnya .....                             | 59 |
| Daftar Pustaka | .....                                                             | 60 |
| Biodata        | .....                                                             | 65 |
| Lampiran       | .....                                                             | 66 |

## Daftar Gambar

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1. <i>Water Box</i> Kondensor .....                                                                                                                                                     | 5  |
| Gambar 2. Ilustrasikan proses korosi galvanik pada baja ( <i>Steel</i> ) yang terendam dalam air laut .....                                                                                    | 6  |
| Gambar 3. Logam Katoda ( <i>Protected Metal</i> ) tetap utuh dan terlindungi dari korosi. ....                                                                                                 | 6  |
| Gambar 4. Kebocoran <i>Water Box</i> Kondensor PLTGU Tj. Uncang .....                                                                                                                          | 7  |
| Gambar 5. <i>Flowchart</i> Penelitian .....                                                                                                                                                    | 21 |
| Gambar 6. Anoda Korban .....                                                                                                                                                                   | 22 |
| Gambar 7. <i>Water Box</i> Kondensor PLTGU Tj. Uncang .....                                                                                                                                    | 24 |
| Gambar 8. Distribusi temporal laju aliran air pendingin dan temperatur inlet kondensor selama periode monitoring. ....                                                                         | 29 |
| Gambar 9. Hasil Simulasi Layer 1: (a) kurva degradasi massa anoda terhadap waktu, dan (b) evolusi arus proteksi katodik serta faktor coating breakdown ....                                    | 32 |
| Gambar 10. Hasil Simulasi Layer 2: (a) perbandingan kurva degradasi massa model dinamis vs baseline, dan (b) distribusi temporal faktor koreksi temperatur (FT) dan aliran ( $F_F$ ) .....     | 35 |
| Gambar 11. Hasil Simulasi Monte Carlo: (a) histogram distribusi 10.000 sampel TTF, dan (b) scatter plot hubungan antara parameter stokastik ( $ic$ , $b$ ) dengan TTF yang dihasilkan .....    | 41 |
| Gambar 12. Analisis Keandalan Weibull: (a) fungsi keandalan $R(t)$ dan CDF $F(t)$ , (b) fungsi laju kegagalan $h(t)$ , dan (c) Weibull probability plot untuk verifikasi goodness-of-fit ..... | 43 |
| Gambar 13. Perbandingan NPV: skenario Preventive Maintenance vs Run-to-Failure selama horizon 10 tahun .....                                                                                   | 55 |

## Daftar Tabel

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1. Parameter Desain Proteksi Katodik Berdasarkan DNV-RP-B401.....                             | 12 |
| Tabel 2. Interpretasi Parameter Bentuk ( $\beta$ ) Distribusi Weibull dalam Analisis Keandalan..... | 17 |
| Tabel 3. Karakterisasi Data Operasional Historis.....                                               | 23 |
| Tabel 4. Parameter Model Berbasis Literatur dan Standar .....                                       | 25 |
| Tabel 5. Rangkuman Statistik Data Monitoring Operasional Kondensor .....                            | 29 |
| Tabel 6. Parameter Input Model Deterministik Baseline .....                                         | 31 |
| Tabel 7. Hasil Simulasi Model Deterministik Baseline (Layer 1) .....                                | 31 |
| Tabel 8. Evolusi Laju Konsumsi Anoda Sepanjang Masa Pakai .....                                     | 33 |
| Tabel 9. Hasil Simulasi Model Dinamis (Layer 2) .....                                               | 35 |
| Tabel 10. Perbandingan Layer 1 vs Layer 2 pada hari ke-100.....                                     | 36 |
| Tabel 11. Hierarki Faktor Percepatan Korosi .....                                                   | 38 |
| Tabel 12. Parameter Stokastik Simulasi Monte Carlo.....                                             | 39 |
| Tabel 13. Langkah 3: Loop waktu internal (langkah-langkah kritis) .....                             | 41 |
| Tabel 14. Statistik Distribusi TTF dari Simulasi Monte Carlo (10.000 Iterasi) .....                 | 42 |
| Tabel 15. Interpretasi parameter $\beta \approx 12,98$ .....                                        | 43 |
| Tabel 16. Milestone Keandalan Anoda .....                                                           | 44 |
| Tabel 17. Perbandingan Kontribusi Tiga Lapis Model.....                                             | 45 |
| Tabel 18. Riwayat Pemasangan dan Kegagalan Anoda Korban .....                                       | 46 |
| Tabel 19. Gap Analysis Kinerja Aktual vs Prediksi Ideal .....                                       | 48 |
| Tabel 20. Perbandingan Estimasi Status Anoda Batch 3 (per Maret 2026) .....                         | 51 |
| Tabel 21. Komponen Biaya untuk Analisis LCCA.....                                                   | 52 |
| Tabel 22. Perhitungan NPV: Skenario Preventive (C = Rp 23,1 juta per kejadian) 54                   |    |
| Tabel 23. Perhitungan NPV: Skenario RTF (C = Rp 3.308,6 juta per kejadian) .....                    | 54 |
| Tabel 24. Perbandingan LCCA: Preventive vs Run-to-Failure (Horizon 10 Tahun) 54                     |    |
| Tabel 25. Anatomi Biaya Komponen Skenario Run-to-Failure (RTF) per Kejadian Kegagalan .....         | 55 |
| Tabel 26. Rekomendasi Strategi Pemeliharaan Anoda Korban .....                                      | 56 |

# Bab 1. Pendahuluan

## 1.1. Latar Belakang

Keandalan operasional Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Tanjung Ugang, yang menyumbang 19,2% dari total pasokan listrik Batam-Bintan, terancam oleh permasalahan kritis berupa kebocoran pada komponen water box kondensor akibat habisnya anoda korban. Informasi mengenai permasalahan tersebut diperoleh berdasarkan hasil observasi lapangan di PLTGU Tanjung Ugang. Strategi pemeliharaan yang berlaku saat ini, yang mengandalkan penggantian anoda berbasis waktu (*Time-Based Maintenance* - TBM), secara inheren tidak efisien. Pendekatan ini menempatkan manajemen dalam dilema antara risiko kegagalan operasional akibat penggantian yang terlambat, yang dapat menyebabkan *forced outage*, dan risiko pemborosan sumber daya akibat penggantian prematur anoda yang masih memiliki sisa umur pakai. Akar masalah yang terjadi bukanlah korosi itu sendiri, melainkan ketidakpastian dalam memprediksi Sisa Umur Pakai (*Remaining Useful Life* - RUL) sistem proteksi katodik. Untuk mengatasi ketidakpastian tersebut, penelitian yang dilakukan mengusulkan pengembangan model simulasi multi-lapis untuk menghasilkan data degradasi sintesis sebagai landasan perumusan strategi pemeliharaan prediktif (PdM) yang efisien dan berbasis risiko.

Pendekatan berbasis simulasi untuk menganalisis sistem proteksi katodik (*Catodic Protection* - CP) bukanlah hal yang baru. Berbagai penelitian telah berhasil menerapkan *Boundary Element Method* (BEM) untuk menyimulasikan distribusi potensial pada struktur baja lepas pantai, dan menyimpulkan bahwa BEM adalah alat yang ampuh untuk analisis semacam ini [1]. Keunggulan utama BEM, sebagaimana ditekankan dalam berbagai studi, terletak pada kemampuannya yang hanya memerlukan diskritisasi pada permukaan batas sistem, sehingga secara signifikan mengurangi beban komputasi. Demikian pula, studi lain menggunakan BEM untuk mengevaluasi proteksi pada pipa bawah laut, yang menunjukkan pentingnya konfigurasi anoda [2]. Lebih lanjut, studi terkini juga menunjukkan penerapan perangkat lunak simulasi modern seperti COMSOL *Multiphysics* untuk memodelkan proteksi katodik pada pipa di lingkungan air laut, yang menegaskan relevansi pendekatan ini dengan teknologi saat ini [3].

Sejalan dengan itu, tujuan akhir untuk menerapkan pemeliharaan prediktif selaras dengan tren terkini dalam manajemen aset modern. Konsep estimasi RUL telah menjadi pilar utama dalam meningkatkan keandalan komponen industri kritis [4]. Berbagai penelitian telah berhasil menerapkan teknik-teknik yang relevan, mulai dari metode statistik seperti Analisis Weibull untuk memodelkan kegagalan akibat keausan (seperti korosi) [5], hingga model *machine learning* untuk sistem yang kaya data sensor [6]. Keberhasilan penerapan RUL di berbagai

sektor menunjukkan bahwa transisi ke strategi prediktif merupakan sebuah perubahan yang logis dan bernilai tinggi.

Meskipun pemodelan simulasi CP dan analisis RUL merupakan dua bidang yang mapan secara terpisah, terdapat kesenjangan yang jelas dalam literatur terkait integrasi sistematis keduanya, khususnya untuk sistem pasif yang "keterbatasan data" (*data-limitation*) seperti Proteksi Katodik Anoda Korban (SACP). Sebagian besar literatur tentang RUL berfokus pada sistem yang kaya data operasional berfrekuensi tinggi, sementara studi mengenai simulasi korosi sering kali berhenti pada lapisan fisis, seperti validasi desain awal, tanpa menyajikan kerangka kerja untuk mentransformasikan hasilnya menjadi intelijen prediktif dinamis seperti RUL. Kesenjangan ini meninggalkan aset-aset kritis tanpa jalur yang jelas untuk menerapkan kerangka berpikir pemeliharaan prediktif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan metodologis tersebut dengan menyajikan sebuah kerangka kerja yang sistematis. Kontribusi utamanya adalah menjembatani antara teori simulasi korosi dan praktik pemeliharaan prediktif untuk aset industri yang keterbatasan data. Secara spesifik, penelitian ini menyajikan sebuah metodologi untuk: (1) menciptakan data operasional deret waktu sintesis melalui simulasi fisis berlapis; dan (2) memanfaatkan set data sintesis tersebut sebagai input untuk analisis keandalan dan prediksi RUL. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menawarkan solusi operasional, tetapi juga mengusulkan konsep baru di mana anoda korban, sebuah komponen pasif, dapat ditransformasikan secara konseptual menjadi sebuah "sensor pasif" yang memungkinkan pengambilan keputusan pemeliharaan yang proaktif dan berbasis data. Oleh karena itu, penelitian dengan judul "**Analisis Laju Konsumsi Anoda Korban pada Water Box Kondensor PLTGU Tanjung Uncang**" ini dilakukan untuk mengkaji secara mendalam fenomena korosi yang terjadi, serta memberikan rekomendasi perbaikan untuk meningkatkan umur pakai komponen dan efisiensi operasional pembangkit.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan utama dalam penelitian ini dapat dirumuskan dalam beberapa pertanyaan berikut:

1. Bagaimana sebuah model simulasi kuantitatif untuk laju konsumsi anoda korban pada *water box* kondensor dapat dikembangkan dengan mengintegrasikan parameter dari standar industri (misalnya, DNV-RP-B401), prinsip-prinsip fisika korosi, dan variabilitas stokastik untuk menghasilkan set data sintesis yang realistis?
2. Bagaimana set data sintesis yang dihasilkan dari model simulasi tersebut dapat digunakan untuk menganalisis dan memprediksi Sisa Umur Pakai (*Remaining Useful Life* - RUL) sistem proteksi katodik dalam berbagai skenario operasional dan lingkungan?

3. Bagaimana hasil analisis prediktif dari data simulasi dapat ditransformasikan menjadi sebuah kerangka kerja strategi pemeliharaan prediktif yang dapat ditindaklanjuti, yang lebih efisien dibandingkan dengan pendekatan pemeliharaan berbasis waktu (*time-based maintenance*) konvensional?

### 1.3. Tujuan

Selaras dengan rumusan masalah yang telah ditetapkan, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan model simulasi multi-lapis (deterministik, dinamis, dan stokastik) untuk laju konsumsi anoda korban yang mampu menghasilkan set data deret waktu (*time-series*) sintetis mengenai kehilangan massa anoda dari waktu ke waktu.
2. Menganalisis set data sintetis yang dihasilkan untuk mengkuantifikasi probabilitas kegagalan dan memprediksi Sisa Umur Pakai (RUL) anoda di bawah pengaruh berbagai parameter operasional (misalnya, temperatur air laut dan laju aliran).
3. Merumuskan rekomendasi teknis untuk kerangka kerja pemeliharaan prediktif pada *water box* kondensor, yang didasarkan pada analisis risiko dan prediksi RUL yang diturunkan dari model simulasi.

### 1.4. Manfaat

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan baik dari sisi praktis-industri maupun akademis:

1. Tersedianya model simulasi untuk prediksi konsumsi anoda.
2. Kemampuan analisis dan prediksi remaining useful (RUL) berbasis data simulasi.
3. Kerangka kerja pemeliharaan prediktif yang efisien dan dapat ditindaklanjuti.

### 1.5. Batasan

Untuk memastikan penelitian ini tetap fokus dan mendalam, ruang lingkupnya dibatasi pada beberapa aspek berikut:

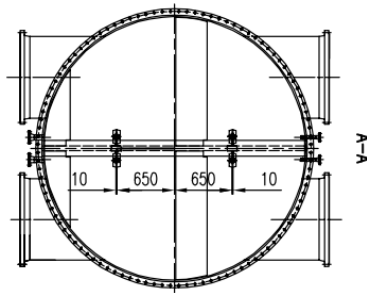
1. **Objek Penelitian:** Fokus penelitian adalah pada *water box* kondensor di PLTGU Tj. Uncang, namun sebagai kasus studi untuk pengembangan dan validasi model.
2. **Metodologi Inti:** Penelitian ini didasarkan pada pengembangan model simulasi untuk menghasilkan data sintetis. Penelitian ini tidak menggunakan atau menganalisis data historis kehilangan massa anoda dari lapangan.

3. **Sumber Parameter Model:** Parameter yang digunakan dalam simulasi (misalnya, densitas arus, kapasitas elektrokimia) didasarkan pada standar industri yang dipublikasikan (seperti DNV-RP-B401), literatur ilmiah, dan asumsi rekayasa yang dapat dipertanggungjawabkan, bukan dari pengukuran langsung di lokasi.
4. **Fokus Keluaran:** Keluaran utama dari penelitian ini adalah sebuah kerangka kerja analitis dan prediktif serta rekomendasi strategi pemeliharaan yang divalidasi dalam lingkungan simulasi, bukan validasi kinerja lapangan dari sistem pemantauan.
5. **Jenis Proteksi:** Analisis terbatas pada sistem proteksi katodik anoda korban (SACP) yang menggunakan material berbasis seng (*zinc*).

## Bab 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 Konteks Sistem dan Tantangan Degradasi Material

*Water box* kondensor merupakan komponen struktural masif dalam sistem pendingin PLTGU yang berfungsi menampung dan mendistribusikan air laut dalam volume besar untuk proses kondensasi uap. Integritas struktural komponen ini, yang umumnya terbuat dari baja karbon karena pertimbangan biaya dan kekuatan mekanis, sangat krusial bagi keandalan operasional pembangkit [7].

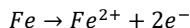


**Gambar 1. *Water Box* Kondensor**

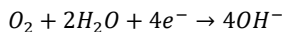
(SUMBER: DOKUMEN TEKNIS *WATER BOX* KONDENSOR PLTGU TANJUNG UNCANG)

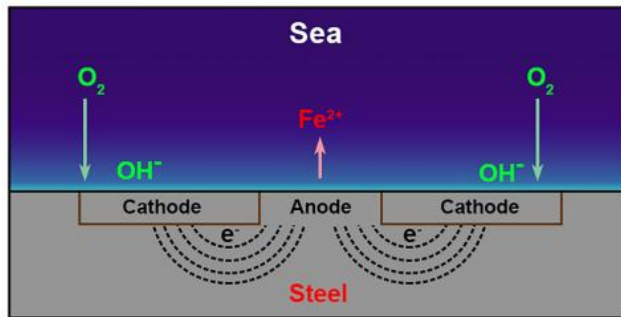
Namun, kombinasi material baja karbon dengan lingkungan operasionalnya, yaitu paparan konstan terhadap air laut tropis yang hangat dan beroksigen, menciptakan kondisi yang sangat agresif dan kondusif untuk degradasi korosi yang cepat [8].

Mekanisme dasar korosi baja karbon di lingkungan air laut adalah proses elektrokimia yang kompleks dan dipercepat oleh beberapa faktor. Proses ini melibatkan pembentukan sel galvanik mikro di permukaan logam, di mana area tertentu bertindak sebagai anoda dan lainnya sebagai katoda [9]. Pada anoda, terjadi reaksi oksidasi di mana besi (Fe) larut menjadi ion besi, melepaskan elektron [10]:



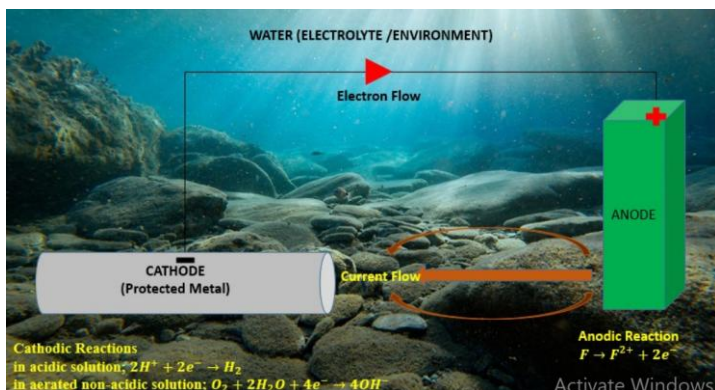
Di lingkungan air laut yang memiliki pH netral hingga sedikit basa, reaksi katodik yang dominan adalah reduksi oksigen terlarut, yang mengkonsumsi elektron yang dihasilkan di anoda [11]:





Gambar 2. Ilustrasikan proses korosi galvanik pada baja (*Steel*) yang terendam dalam air laut

Sumber : [Degruyterbrill.com](http://Degruyterbrill.com)



Gambar 3. Logam Katoda (*Protected Metal*) tetap utuh dan terlindungi dari korosi.

Sumber : <https://journal2.uad.ac.id/index.php/biste/article/view/11512>

Agresivitas lingkungan air laut tropis diperparah oleh dua faktor utama. Pertama, tingginya konsentrasi garam terlarut, terutama ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ), menjadikan air laut sebagai elektrolit dengan konduktivitas listrik yang sangat tinggi. Hal ini memfasilitasi aliran arus korosi antara anoda dan katoda, sehingga secara signifikan meningkatkan laju korosi secara keseluruhan [8]. Kedua, pasokan

oksigen terlarut yang berkelanjutan, yang difasilitasi oleh aliran air pendingin yang konstan di dalam *water box*, memastikan bahwa reaksi katodik, yang sering kali menjadi tahap pembatas laju korosi, tidak terhambat [11]. Kombinasi dari elektrolit yang sangat konduktif dan pasokan reaktan katodik yang melimpah ini menjadikan *water box* kondensor sebagai reaktor elektrokimia yang sangat aktif, yang menuntut sistem proteksi korosi yang robust dan berlapis.

Untuk mengatasi tantangan degradasi ini, strategi proteksi ganda yang menggabungkan lapisan pelindung (*coating*) dan Proteksi Katodik Anoda Korban (*Sacrificial Anode Cathodic Protection* - SACP) menjadi standar praktik industri [12]. *Coating* berfungsi sebagai barier primer yang bersifat pasif, bertujuan untuk mengisolasi permukaan baja secara fisik dari kontak langsung dengan elektrolit air laut [13]. Secara teoretis, *coating* yang sempurna akan menghentikan semua aktivitas korosi. Namun, dalam aplikasi dunia nyata, tidak ada *coating* yang sempurna; cacat mikroskopis, kerusakan selama instalasi, atau degradasi seiring waktu tidak dapat dihindari [14].



**Gambar 4. Kebocoran *Water Box* Kondensor PLTGU Tj. Uncang**

(SUMBER: DOKUMENTASI PRIBADI PLTGU TANJUNG UNCANG)

Berdasarkan hasil observasi lapangan, kebocoran yang ditunjukkan pada Gambar 4 berupa lubang perforasi tak beraturan akibat korosi tembus (*through-wall corrosion*) pada dinding pelat baja karbon *water box* yang memiliki ketebalan 10 mm (sebagaimana ditunjukkan pada potongan melintang Gambar 2.1). Perforasi ini memiliki dimensi bukaan maksimum sekitar 4–6 cm (40–60 mm),

dengan bagian bukaan efektif yang lebih sempit akibat tumpukan produk korosi di sekelilingnya.

Cacat atau *holiday* pada *coating* ini menjadi titik lemah yang sangat berbahaya. Cacat ini menciptakan situasi di mana area anodik yang kecil (baja yang terekspos) terhubung secara elektrik dengan area katodik yang sangat luas (permukaan baja di bawah *coating* yang masih utuh). Rasio area katoda-ke-anoda yang besar ini secara drastis meningkatkan densitas arus korosi pada titik cacat, yang mengarah pada serangan korosi lokal yang sangat terkonsentrasi dan cepat, seperti korosi sumuran (*pitting corrosion*) [14]. Di sinilah peran SACP sebagai proteksi sekunder menjadi vital. Dengan menghubungkan struktur baja (katoda) ke logam yang lebih aktif secara elektrokimia (anoda korban, biasanya paduan seng atau aluminium), sebuah sel galvanik makro sengaja diciptakan [10]. Anoda korban akan terkorosi secara preferensial, melepaskan elektron protektif yang mengalir ke struktur baja. Aliran elektron ini menekan potensial elektrokimia seluruh permukaan baja, termasuk di area cacat *coating*, ke tingkat di mana reaksi pelarutan besi menjadi tidak mungkin secara termodinamika [15]. Dengan demikian, *coating* dan SACP bekerja secara sinergis: *coating* secara drastis mengurangi total luas permukaan yang perlu dilindungi, sehingga menurunkan jumlah total arus protektif yang dibutuhkan, sementara SACP memberikan perlindungan aktif pada titik-titik di mana barrier primer gagal [12].

## 2.2 Konsep Kunci: "Permintaan Arus" sebagai Indikator Integritas

Konsep "Permintaan Arus" atau *Current Demand* adalah parameter teknis dasar dalam proteksi katodik. Parameter ini didefinisikan sebagai total arus listrik (dalam Ampere) yang harus disuplai oleh sistem proteksi katodik untuk mempolarisasi seluruh permukaan logam yang dilindungi ke potensial protektif, yaitu potensial di mana laju korosi menjadi dapat diabaikan [16]. Untuk baja karbon di air laut, potensial protektif yang diterima secara universal adalah -0.80 Volt atau lebih negatif relatif terhadap elektroda referensi perak/perak klorida (Ag/AgCl) [17]. Permintaan arus ini secara langsung mencerminkan kondisi kesehatan keseluruhan dari sistem proteksi ganda.

Landasan teoretis yang menghubungkan degradasi *coating* dengan peningkatan permintaan arus terletak pada hubungan langsung antara arus yang dibutuhkan dan luas permukaan baja yang terekspos secara efektif ke elektrolit [14]. Pada sistem yang baru dipasang dengan *coating* berkualitas tinggi, luas permukaan yang terekspos sangat kecil, terbatas pada cacat mikroskopis awal. Akibatnya, permintaan arus awal sangat rendah [18]. Seiring berjalannya waktu, *coating* mengalami degradasi melalui berbagai mekanisme seperti penyerapan air, pembentukan lepuhan (*blistering*), retak, atau kerusakan mekanis. Setiap bentuk

degradasi ini secara efektif meningkatkan luas permukaan baja yang bersentuhan langsung dengan air laut.

Peningkatan luas permukaan katodik yang terekspos ini secara langsung menuntut suplai elektron yang lebih besar dari sistem SACP untuk mempertahankan potensial protektif di seluruh area tersebut. Jika suplai arus dari anoda tidak mencukupi untuk memenuhi permintaan yang meningkat ini, potensial struktur akan bergeser ke arah yang lebih positif (kurang protektif), dan korosi akan kembali terjadi di lokasi cacat. Oleh karena itu, peningkatan permintaan arus total dari sistem SACP merupakan indikator kuantitatif yang langsung dan andal dari penurunan integritas *coating* [14].

Hubungan ini diformalkan dalam standar desain industri seperti DNV-RP-B401 melalui persamaan untuk menghitung permintaan arus ( $I_c$ ) [19]:

$$I_c = A_c \times i_c \times f_c \quad (2.1)$$

dimana:

- $I_c$  adalah permintaan arus total (A).
- $A_c$  adalah total luas permukaan geometris dari struktur yang dilindungi ( $m^2$ ).
- $i_c$  adalah densitas arus proteksi yang dibutuhkan untuk baja telanjang dalam lingkungan spesifik ( $A/m^2$ ). Nilai ini merupakan parameter empiris yang ditentukan oleh standar berdasarkan kondisi lingkungan seperti suhu dan salinitas.
- $f_c$  adalah *Coating Breakdown Factor* (Faktor Kerusakan *Coating*), sebuah parameter tanpa dimensi antara 0 dan 1.

*Coating Breakdown Factor* ( $f_c$ ) adalah konsep kunci yang secara kuantitatif menjembatani kondisi fisik *coating* dengan parameter elektrik sistem proteksi. Faktor ini merepresentasikan fraksi dari total luas permukaan yang, dari sudut pandang elektrokimia, berperilaku seolah-olah tidak terlapis (*bare steel*). Sebagai contoh, nilai  $f_c$  sebesar 0.05 (atau 5%) mengindikasikan bahwa *coating* telah terdegradasi sedemikian rupa sehingga permintaan arusnya setara dengan 5% dari total luas permukaan struktur jika dalam kondisi telanjang sepenuhnya. Seiring waktu, nilai  $f_c$  diasumsikan akan meningkat, yang mencerminkan proses degradasi *coating* yang progresif.

Dengan demikian, hubungan kuantitatif ini menjadi dasar dari metodologi penelitian. Hukum dasar elektrokimia (yang akan dibahas di bagian selanjutnya) mengikat secara langsung laju konsumsi massa anoda korban dengan total arus yang dihasilkannya. Karena total arus yang dihasilkan (suplai) harus sama dengan total arus yang dibutuhkan (permintaan) untuk menjaga sistem dalam kesetimbangan protektif, maka laju konsumsi anoda menjadi proksi langsung untuk permintaan arus. Dengan memantau laju kehilangan massa anoda, secara

tidak langsung kita memantau permintaan arus, yang pada gilirannya merupakan cerminan dari tingkat kerusakan *coating* ( $f_c$ ). Pendekatan ini secara konseptual mengubah anoda korban dari sekadar komponen habis pakai menjadi sebuah sensor pasif *in-situ* yang mengintegrasikan dan melaporkan kondisi kesehatan sistem proteksi korosi secara keseluruhan, menjembatani kesenjangan data yang melekat pada sistem SACP pasif.

## 2.3 Landasan Teoretis untuk Model Simulasi Konsumsi Anoda

Pengembangan model simulasi yang andal untuk laju konsumsi anoda korban memerlukan fondasi teoretis yang kuat, yang dibangun secara berlapis dari prinsip-prinsip dasar elektrokimia, fisika, hingga konsep probabilitas. Setiap lapisan menambahkan tingkat keakuratan yang lebih tinggi, memvalidasi pendekatan metodologis yang diusulkan untuk menghasilkan set data sintesis yang representatif.

### 2.3.1 Justifikasi Model Berbasis Standar (Layer 1)

Lapisan pertama dari model simulasi, yang bersifat deterministik, didasarkan pada prinsip-prinsip teknik yang telah terstandarisasi dan diterima secara luas di industri. Justifikasi untuk lapisan ini bersumber dari hukum fisika dasar dan penerapannya dalam praktik desain rekayasa.

#### Hukum Elektrolisis Faraday

Dasar ilmiah yang paling mendasar untuk menghubungkan aktivitas listrik dengan perubahan massa material adalah Hukum Elektrolisis Faraday. Diformulasikan pada abad ke-19, hukum ini menyatakan bahwa jumlah perubahan kimia yang dihasilkan oleh arus listrik, dalam hal ini, pelarutan logam anoda berbanding lurus secara kuantitatif dengan jumlah muatan listrik yang melewatinya [20]. Secara matematis, hubungan ini dapat diekspresikan sebagai berikut [21]:

$$w = \frac{I \times t \times M}{n \times F} \quad (2.2)$$

dimana:

- $w$  adalah massa anoda yang terlarut (gram).
- $I$  adalah arus listrik yang mengalir dari anoda (Ampere).
- $t$  adalah waktu selama arus mengalir (detik).

- $M$  adalah massa molar dari material anoda (g/mol).
- $n$  adalah jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi oksidasi per atom anoda (valensi).
- $F$  adalah konstanta Faraday (sekitar 96,485 C/mol).

Hukum ini menyediakan hubungan sebab-akibat yang absolut dan deterministik: untuk setiap Ampere arus yang dihasilkan oleh anoda selama periode waktu tertentu, sejumlah massa yang dapat dihitung secara presisi akan hilang. Ini adalah "mesin" kalkulasi inti yang memvalidasi penggunaan laju kehilangan massa sebagai proksi untuk keluaran arus.

### Aplikasi dalam Standar Industri (DNV-RP-B401)

Standar industri seperti DNV-RP-B401 mengambil prinsip-prinsip dasar ini dan mengoperasionalkannya ke dalam parameter desain praktis untuk sistem proteksi katodik [17]. Standar ini menyediakan nilai-nilai konservatif yang dirancang untuk memastikan keandalan sistem dalam kondisi operasional yang diantisipasi. Dua parameter kunci yang relevan untuk model berbasis standar adalah:

1. **Kapasitas Elektrokimia ( $\epsilon$ ):** Parameter ini, yang biasanya dinyatakan dalam Ampere-jam per kilogram (Ah/kg), adalah aplikasi langsung dari Hukum Faraday yang disesuaikan untuk material anoda spesifik. Kapasitas ini merepresentasikan total muatan listrik yang dapat dihantarkan oleh satu kilogram material anoda sebelum habis dikonsumsi [17]. Untuk anoda seng, DNV-RP-B401 menetapkan nilai tipikal sekitar 780 Ah/kg. Parameter ini memungkinkan konversi langsung antara total arus yang disuplai (dalam Ampere) selama umur pakai anoda dengan massa total anoda yang dibutuhkan.
2. **Densitas Arus Proteksi ( $i_c$ ):** Parameter ini, yang dinyatakan dalam Ampere per meter persegi ( $A/m^2$ ), mendefinisikan permintaan arus per satuan luas untuk baja telanjang pada kondisi lingkungan tertentu [17]. DNV menyediakan tabel nilai densitas arus desain (awal, rata-rata, dan akhir) untuk berbagai zona iklim dan kedalaman air. Untuk air laut tropis, nilai desain rata-rata yang konservatif berada di kisaran 0.070 hingga 0.080  $A/m^2$  [18].

Dengan menggabungkan parameter-parameter ini, model simulasi lapisan pertama dapat dibangun. Model ini secara deterministik menghitung laju konsumsi anoda berdasarkan asumsi kondisi desain yang konstan dan degradasi *coating* yang terprediksi.

**Tabel 1. Parameter Desain Proteksi Katodik Berdasarkan DNV-RP-B401**

| <b>Parameter Desain</b>                                | <b>Deskripsi</b>                                                                                                                                           | <b>Nilai Tipikal (DNV-RP-B401)</b> |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Densitas Arus Rata-rata (<math>i_{mean}</math>)</b> | Permintaan arus rata-rata per satuan luas untuk baja telanjang di air laut tropis (>20°C, kedalaman 0-30 m). Digunakan untuk menghitung massa total anoda. | 0.070A/m <sup>2</sup>              |
| <b>Kapasitas Elektrokimia (<math>\epsilon</math>)</b>  | Total muatan listrik yang dapat dihantarkan per kg massa anoda seng yang dikonsumsi.                                                                       | 780 Ah/kg                          |
| <b>Faktor Utilisasi (<math>u</math>)</b>               | Fraksi dari massa total anoda yang dapat dikonsumsi secara efektif sebelum kinerjanya menjadi tidak andal.                                                 | 0.80 – 0.90                        |

Standar industri, melalui 'Faktor Utilisasi' ( $u$ ), mengakui bahwa tidak seluruh massa anoda dapat digunakan sebelum kinerjanya menurun akibat perubahan geometri dan peningkatan resistansi. Oleh karena itu, massa anoda efektif ( $M_{efektif}$ ) yang menjadi dasar perhitungan umur pakai dihitung sebagai berikut [22]:

$$M_{efektif} = M_{awal} \times u \quad (2.3)$$

**Dimana:**

- $M_{efektif}$  = Massa anoda efektif yang dapat dikonsumsi (kg)
- $M_{awal}$  = Massa awal anoda (kg)
- $u$  = Faktor utilisasi anoda (tanpa dimensi)

Selanjutnya, untuk memodelkan permintaan arus sebagai fungsi waktu, [Persamaan \(2.1\)](#) diperluas dengan mengasumsikan bahwa faktor kerusakan coating ( $f_c$ ) meningkat seiring berjalannya waktu. Model baseline mengadopsi pendekatan linear sederhana untuk degradasi ini, yang merepresentasikan laju kerusakan rata-rata selama masa pakai aset. Pendekatan ini merupakan simplifikasi rekayasa yang umum digunakan untuk estimasi desain jangka panjang [23]. Formulasi permintaan arus baseline sebagai fungsi waktu ( $t$ ) adalah sebagai berikut [24]:

$$I_{c,baseline}(t) = A_c \times i_c \times (f_{c,0} + b \cdot t) \quad (2.4)$$

**Dimana:**

- $I_{c,baseline}(t)$  = Permintaan arus baseline pada waktu  $t$  (Ampere)

- $[A_c]$  = Total luas permukaan yang dilindungi ( $m^2$ )
- $i_c$  = Densitas arus proteksi untuk baja di air laut tropis ( $A/m^2$ )
- $f_{c,0}$  = Faktor kerusakan coating awal (tanpa dimensi)
- $b$  = Laju degradasi coating (per tahun)
- $t$  = Waktu operasional (tahun)

### 2.3.2 Justifikasi Model Berbasis Fisika (Layer 2)

Model berbasis standar memberikan fondasi yang solid namun secara inheren bersifat statis dan konservatif. Ia mengasumsikan kondisi lingkungan yang tidak berubah, sebuah asumsi yang tidak merefleksikan realitas operasional. Lapisan kedua dari model simulasi, yaitu model dinamis berbasis fisika, dibenarkan oleh kebutuhan untuk memperhitungkan pengaruh fluktuasi parameter lingkungan terhadap laju reaksi elektrokimia.

#### Pengaruh Temperatur dan Persamaan Arrhenius

Korosi adalah sebuah reaksi elektrokimia, dan seperti kebanyakan reaksi kimia, lajunya sangat bergantung pada temperatur. Hubungan antara temperatur dan laju reaksi dijelaskan oleh Persamaan Arrhenius [25]:

$$k = Ae^{-E_a/(RT)} \quad (2.5)$$

Dimana:

- $k$  adalah konstanta laju reaksi.
- $A$  adalah faktor pra-eksponensial (faktor frekuensi).
- $E_a$  adalah energi aktivasi reaksi (J/mol).
- $R$  adalah konstanta gas universal (8.314 J/mol-K).
- $T$  adalah temperatur absolut (Kelvin).

Persamaan ini menunjukkan bahwa laju reaksi meningkat secara eksponensial dengan kenaikan temperatur. Dalam konteks korosi anoda, temperatur yang lebih tinggi meningkatkan mobilitas ion dalam elektrolit dan mempercepat kinetika transfer muatan di antarmuka elektroda-elektrolit, yang keduanya berkontribusi pada laju disolusi anoda yang lebih tinggi [26]. Studi empiris mengkonfirmasi bahwa laju korosi di perairan tropis yang hangat dapat beberapa kali lebih tinggi dibandingkan di perairan dingin.

Model permintaan arus *baseline* pada [Persamaan \(2.4\)](#) memberikan fondasi yang solid, namun memiliki keterbatasan fundamental karena mengasumsikan kondisi operasional yang statis. Pada kenyataannya, laju reaksi elektrokimia

sangat dipengaruhi oleh fluktuasi lingkungan, terutama temperatur air laut. Untuk menjembatani kesenjangan ini, prinsip Arrhenius ([Persamaan 2.5](#)) dapat diadaptasi dari sebuah konsep kualitatif menjadi faktor koreksi kuantitatif yang dinamis. Faktor koreksi temperatur ( $F_T(t)$ ) ini memodulasi permintaan arus *baseline* berdasarkan perubahan temperatur aktual terhadap suatu kondisi referensi, sehingga menangkap dinamika laju korosi yang lebih realistis [27]:

$$[F_T(t) = \exp \left[ -\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T(t)} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (2.6)$$

**Dimana:**

- $E_a$  = Energi aktivasi korosi seng (kJ/mol atau J/mol)
- $R$  = Konstanta gas universal (8.314 J/mol·K)
- $T(t)$  = Temperatur lingkungan pada waktu  $t$ (K)
- $T_{ref}$  = Temperatur referensi (298.15 K)

#### **Pengaruh Kecepatan Aliran Fluida dan Transpor Oksigen**

Seperti telah dijelaskan, reaksi katodik yang mengendalikan laju korosi secara keseluruhan di air laut adalah reduksi oksigen terlarut. Laju reaksi ini seringkali tidak dikendalikan oleh kinetika elektrokimia itu sendiri, melainkan oleh laju di mana oksigen dapat diangkut dari badan air (bulk) ke permukaan logam. Proses ini dikenal sebagai kontrol transpor massa. Kecepatan aliran fluida memainkan peran dominan dalam proses transpor massa. Pada kondisi stagnan atau aliran lambat (laminar), transpor oksigen terutama terjadi melalui difusi melintasi lapisan batas hidrodinamik yang tebal, sebuah proses yang relatif lambat. Ketika kecepatan aliran meningkat, terutama ke dalam rezim turbulen, lapisan batas menjadi lebih tipis, dan mekanisme transpor konvektif menjadi dominan [28]. Konveksi secara jauh lebih efisien mengirimkan oksigen ke permukaan katodik, sehingga menghilangkan hambatan transpor massa dan memungkinkan reaksi katodik berlangsung pada laju yang lebih tinggi [29]. Peningkatan laju reaksi katodik ini, pada gilirannya, menuntut laju reaksi anodik yang lebih tinggi untuk menyeimbangkan aliran elektron, yang berarti laju konsumsi anoda korban meningkat.

Hubungan antara kecepatan aliran dan laju korosi yang dikontrol oleh transpor massa seringkali dimodelkan secara empiris menggunakan pendekatan power-law. Model ini secara efektif menangkap hubungan non-linear antara kecepatan fluida dan laju transpor reaktan (seperti oksigen) ke permukaan [30]. Faktor koreksi laju aliran ( $F_F(t)$ ) dapat diekspresikan sebagai [31]:

$$F_F(t) = \left( \frac{v(t)}{v_{ref}} \right)^m \quad (2.7)$$

Dengan menggabungkan kedua faktor koreksi dinamis ini, model permintaan arus baseline dapat disempurnakan menjadi model dinamis yang jauh lebih representatif terhadap kondisi operasional nyata. Permintaan arus dinamis ( $I_{c,dinamis}(t)$ ) dihitung sebagai produk dari permintaan arus baseline dengan kedua faktor koreksi tersebut [32]:

$$I_{c,dinamis}(t) = I_{c,baseline}(t) \times F_T(t) \times F_F(t) \quad (2.8)$$

Nilai permintaan arus dinamis ini kemudian digunakan untuk menghitung konsumsi massa anoda secara iteratif pada setiap langkah waktu ( $\Delta t$ ) simulasi. Dengan menerapkan kembali prinsip Faraday (melalui parameter kapasitas elektrokimia,  $\epsilon$ ), kehilangan massa inkremental ( $\Delta w(t)$ ) dan total ( $W_{total}(t)$ ) dapat dihitung sebagai berikut[24]:

$$\Delta w(t) = \frac{I_{c,dinamis}(t) \times \Delta t}{\epsilon} \quad (2.9)$$

$$W_{total}(t) = W_{total}(t - 1) + \Delta w(t) \quad (2.10)$$

**Dimana:**

- $\Delta w(t)$  = Inkremental massa anoda yang terkonsumsi selama interval  $\Delta t$  (kg)
- $\Delta t$  = Langkah waktu simulasi (jam)
- $\epsilon$  = Kapasitas elektrokimia seng (Ah/kg)
- $W_{total}(t)$  = Total massa anoda yang terkonsumsi hingga waktu  $t$  (kg)

### 2.3.3 Justifikasi Model Stokastik (Layer 3)

Meskipun model dinamis berbasis fisika telah memperhitungkan variasi lingkungan yang dapat diprediksi, ia masih bersifat deterministik. Model ini mengasumsikan bahwa jika input (temperatur, aliran) diketahui secara pasti, output (laju konsumsi) juga dapat diketahui secara pasti. Namun, proses degradasi di dunia nyata memiliki komponen acak atau stokastik yang tidak dapat diabaikan [33].

#### **Sifat Stokastik Proses Degradasi**

Sifat stokastik dari korosi, khususnya korosi lokal seperti pitting, telah diakui secara luas dalam literatur [33]. Proses ini sering dimodelkan sebagai proses Markov, di mana keadaan masa depan sistem hanya bergantung pada keadaan saat ini, bukan pada sejarah masa lalunya, yang mencerminkan sifat acak dari kejadian korosi. Kerandoman ini berasal dari berbagai sumber yang sulit atau tidak mungkin untuk dimodelkan secara deterministik, antara lain:

- **Heterogenitas Material:** Variasi mikrostruktur, adanya inklusi non-logam, dan orientasi butir yang berbeda pada permukaan baja dan anoda menciptakan distribusi acak dari situs yang lebih rentan terhadap inisiasi korosi.
- **Variabilitas Kualitas Aplikasi *Coating*:** Ketebalan, adhesi, dan porositas *coating* tidak pernah seragam secara sempurna di seluruh permukaan yang luas, menghasilkan distribusi acak dari titik-titik lemah awal.
- **Turbulensi Aliran Lokal:** Meskipun kecepatan aliran rata-rata dapat diketahui, fluktuasi turbulen lokal menciptakan variasi acak dalam laju transpor massa dan tegangan geser di berbagai titik pada permukaan *water box*.
- **Aktivitas Biologis:** Pembentukan biofilm (*biofouling*) bersifat tidak seragam dan dapat menciptakan kondisi kimia lokal yang berbeda secara acak di bawahnya, sebuah fenomena yang dikenal sebagai *Microbiologically Influenced Corrosion* (MIC).

#### Justifikasi Penggunaan Simulasi Monte Carlo

Mengingat adanya sumber-sumber ketidakpastian yang melekat ini, pendekatan yang paling tepat untuk memodelkan umur pakai sistem adalah melalui metode probabilistik. Simulasi Monte Carlo adalah teknik komputasi yang sangat cocok untuk tujuan ini [34]. Alih-alih menghitung satu hasil tunggal, metode ini menjalankan simulasi dinamis ribuan kali [35]. Dalam setiap iterasi, nilai-nilai parameter yang memiliki ketidakpastian (misalnya, laju degradasi coating, efisiensi anoda lokal) diambil secara acak dari distribusi probabilitas yang telah ditentukan. Proses ini menghasilkan bukan satu kurva degradasi, melainkan ribuan kemungkinan kurva degradasi yang berbeda [34].

Hasil dari simulasi Monte Carlo bukanlah prediksi tunggal ("anoda akan habis dalam 28.7 bulan"), melainkan sebuah distribusi probabilitas dari hasil yang mungkin ("ada probabilitas 90% bahwa anoda akan habis antara 26 dan 32 bulan, dengan nilai paling mungkin adalah 29 bulan"). Pendekatan ini secara dasar mengubah analisis dari prediksi deterministik menjadi manajemen risiko probabilistik. Ini memvalidasi lapisan ketiga dari metodologi simulasi, yang bertujuan untuk mengkuantifikasi ketidakpastian dan menyediakan output yang dapat digunakan secara langsung untuk analisis keandalan dan pengambilan keputusan berbasis risiko.

## 2.4 Landasan Teoretis untuk Kerangka Analisis Prediktif

Setelah set data sintesis yang realistis dan berlapis dihasilkan melalui simulasi, langkah selanjutnya adalah menerapkannya dalam kerangka analisis yang dapat mengubah data mentah menjadi wawasan prediktif yang dapat ditindaklanjuti.

Landasan teoretis untuk kerangka ini berasal dari disiplin ilmu rekayasa keandalan, manajemen aset, dan ekonomi rekayasa.

### Analisis Keandalan dan Distribusi Weibull

Analisis Keandalan adalah cabang rekayasa yang berfokus pada kuantifikasi dan prediksi probabilitas kegagalan suatu komponen atau sistem seiring waktu. Salah satu alat statistik yang paling kuat dan banyak digunakan dalam analisis keandalan adalah Distribusi Weibull [36]. Fleksibilitasnya yang luar biasa memungkinkannya untuk memodelkan berbagai macam perilaku kegagalan.

Distribusi Weibull 2-parameter dijelaskan oleh fungsi kepadatan probabilitas yang bergantung pada dua parameter utama:

1. **Parameter Skala ( $\eta$ , Eta):** Juga dikenal sebagai umur karakteristik,  $\eta$  merepresentasikan waktu di mana sekitar 63.2% dari populasi komponen diperkirakan telah gagal. Ini memberikan ukuran skala waktu dari proses kegagalan.
2. **Parameter Bentuk ( $\beta$ , Beta):** Ini adalah parameter yang paling informatif karena menggambarkan mode kegagalan yang mendasarinya. Interpretasi nilai  $\beta$  sangat penting untuk memahami sifat fisik dari proses degradasi [37].

**Tabel 2. Interpretasi Parameter Bentuk ( $\beta$ ) Distribusi Weibull dalam Analisis Keandalan.**

| Nilai Parameter Bentuk ( $\beta$ ) | Rezim Kegagalan                          | Karakteristik Laju Kegagalan                      | Contoh Mekanisme Fisik                                              |
|------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $\beta < 1$                        | <i>Infant Mortality</i> (Kegagalan Dini) | Laju kegagalan menurun seiring waktu.             | Cacat manufaktur, kesalahan instalasi, kerusakan awal.              |
| $\beta = 1$                        | <i>Random Failure</i> (Kegagalan Acak)   | Laju kegagalan konstan (Distribusi Eksponensial). | Beban kejut eksternal, kejadian acak yang tidak terkait usia.       |
| $\beta > 1$                        | <i>Wear-out Failure</i> (Kegagalan Aus)  | Laju kegagalan meningkat seiring waktu.           | Kelelahan ( <i>fatigue</i> ), korosi, erosi, konsumsi anoda korban. |

Proses konsumsi anoda korban adalah contoh klasik dari mekanisme kegagalan aus (*wear-out failure*). Massa anoda secara sistematis berkurang dari waktu ke waktu, dan probabilitas anoda tersebut "gagal" (yaitu, habis terkonsumsi hingga di bawah faktor utilisasi yang efektif) meningkat seiring dengan bertambahnya usia operasionalnya. Oleh karena itu, secara teoretis, data waktu-hingga-kegagalan anoda yang dihasilkan oleh simulasi Monte Carlo diharapkan akan sangat cocok dengan Distribusi Weibull dengan parameter bentuk  $\beta > 1$ . Penggunaan analisis Weibull dengan demikian merupakan metode yang tepat secara teoritis untuk memodelkan probabilitas kegagalan sistem proteksi katodik sebagai fungsi waktu.

Secara matematis, probabilitas sebuah komponen atau sistem bertahan (atau tidak gagal) hingga waktu  $t$ , yang dikenal sebagai Fungsi Keandalan ( $R(t)$ ), untuk distribusi Weibull 2-parameter diberikan oleh persamaan [38]:

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (2.11)$$

**Dimana:**

- $R(t)$  = Keandalan (probabilitas bertahan) pada waktu  $t$
- $t$  = Waktu operasional
- $\beta$  = Parameter bentuk (*shape parameter*). Mengindikasikan mode kegagalan. Nilai  $\beta > 1$  menunjukkan kegagalan akibat keausan, yang diharapkan untuk proses konsumsi anoda.
- $\eta$  = Parameter skala (*scale parameter*). Dikenal sebagai umur karakteristik, yaitu waktu di mana sekitar 63.2% dari populasi diperkirakan telah gagal.

### **Sisa Umur Pakai (Remaining Useful Life - RUL)**

Sisa Umur Pakai (RUL) adalah metrik utama dalam konsep pemeliharaan prediktif (Predictive Maintenance - PdM). RUL didefinisikan sebagai estimasi durasi waktu yang tersisa bagi suatu komponen untuk dapat beroperasi secara andal sebelum mencapai kondisi kegagalan fungsional [39]. Berbeda dengan metrik keandalan tradisional yang melihat probabilitas kegagalan dari waktu nol, RUL adalah prediksi dinamis yang diperbarui berdasarkan data kondisi dan riwayat operasional komponen tersebut [40].

Dalam konteks penelitian ini, RUL anoda korban adalah estimasi waktu yang tersisa sebelum massa anoda mencapai batas minimum yang dapat diterima. Dengan mengembangkan model (misalnya, model regresi) yang menghubungkan parameter operasional historis (seperti usia, suhu kumulatif, dan paparan aliran) dengan RUL, dimungkinkan untuk beralih dari jadwal pemeliharaan berbasis waktu yang kaku ("ganti setiap 24 bulan") ke strategi berbasis kondisi ("ganti ketika RUL yang diprediksi kurang dari 6 bulan"). Ini memungkinkan perencanaan

pemeliharaan yang lebih efisien, meminimalkan risiko kegagalan tak terduga sambil menghindari penggantian komponen yang prematur [41].

### **Analisis Biaya Siklus Hidup (Life Cycle Cost Analysis - LCCA)**

Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA) adalah metodologi ekonomi yang digunakan untuk mengevaluasi total biaya kepemilikan suatu aset selama seluruh siklus hidupnya [42]. LCCA tidak hanya mempertimbangkan biaya investasi awal, tetapi juga semua biaya masa depan yang relevan, termasuk biaya operasi, pemeliharaan, perbaikan, penggantian, dan pembuangan, yang semuanya didiskontokan ke nilai sekarang untuk memungkinkan perbandingan yang adil antar alternatif.

Tujuan utama LCCA dalam penelitian ini adalah untuk memberikan justifikasi finansial yang kuantitatif bagi adopsi strategi pemeliharaan prediktif. Kerangka kerja ini memungkinkan perbandingan dua skenario utama:

1. **Strategi Pemeliharaan Berbasis Waktu/Reaktif:** Biaya dalam skenario ini mencakup biaya penggantian terjadwal dan, yang lebih penting, biaya berbasis risiko dari kegagalan yang tidak direncanakan. Biaya ini mencakup kerugian produksi akibat *forced outage*, biaya perbaikan darurat yang lebih tinggi, dan potensi kerusakan sekunder pada *water box* itu sendiri.
2. **Strategi Pemeliharaan Prediktif:** Biaya dalam skenario ini terutama adalah biaya penggantian terencana yang dioptimalkan berdasarkan prediksi RUL. Meskipun memerlukan investasi dalam analisis data, strategi ini secara signifikan mengurangi probabilitas kegagalan tak terduga, sehingga menghindari biaya konsekuensial yang jauh lebih besar.

Untuk membandingkan kedua skenario ini secara objektif, total biaya selama siklus hidup untuk masing-masing strategi dapat diformulasikan secara matematis. Model biaya untuk TBM harus mencakup biaya risiko kegagalan tak terduga ( $P_{fail}$ ), sementara model PdM menggantinya dengan biaya monitoring dan analisis, dengan tujuan utama menekan risiko tersebut hingga mendekati nol. Persamaannya adalah [43]:

$$LCC_{TBM} = n \times [C_{ganti}] + P_{fail} \times [C_{outage}] \quad (2.12)$$

$$LCC_{PdM} = n \times [C_{ganti}] + [C_{monitoring}] \quad (2.13)$$

**Dimana:**

- $[C_{ganti}] = \text{Placeholder: Biaya Penggantian Anoda Terencana}$

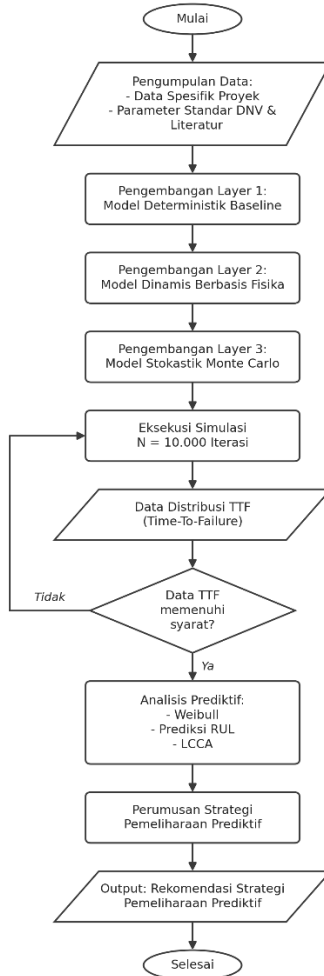
- $[C_{\text{outage}}]$  = *Placeholder*: Biaya Kerugian *Forced Outage* (termasuk kehilangan produksi dan perbaikan darurat)
- $[C_{\text{monitoring}}]$  = *Placeholder*: Biaya Implementasi Sistem Monitoring dan Analisis
- $n$  = Jumlah siklus penggantian selama periode analisis
- $P_{\text{fail}}$  = Probabilitas kegagalan sebelum interval TBM berikutnya (dihitung dari fungsi Weibull)

Dengan menerapkan LCCA, hasil analisis teknis (probabilitas kegagalan dari analisis Weibull dan prediksi RUL) dapat diterjemahkan ke dalam bahasa bisnis: biaya, risiko, dan pengembalian investasi (Return on Investment - ROI). Ini adalah alat penting untuk pengambilan keputusan manajerial, yang menunjukkan secara kuantitatif mengapa investasi dalam pendekatan prediktif berbasis simulasi lebih unggul secara ekonomi dibandingkan dengan pendekatan tradisional.

## Bab 3. Metodologi Penelitian

### 3.1 Kerangka Pikir dan Alur Penelitian

Alur penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut:



**Gambar 5. Flowchart Penelitian**

### 3.2 Objek dan Tempat Penelitian

- **Objek Penelitian:** Objek utama dalam penelitian ini adalah sistem Proteksi Katodik Anoda Korban (Sacrificial Anode Cathodic Protection - SACP) yang terpasang di dalam *water box* kondensor.
- **Tempat Penelitian:** Studi kasus untuk penelitian ini dilakukan di PLTGU Tanjung Uncang. Fasilitas ini menjadi sumber data primer untuk penelitian, yang mencakup data desain (spesifikasi teknis anoda korban) dan data operasional (parameter harian air pendingin).

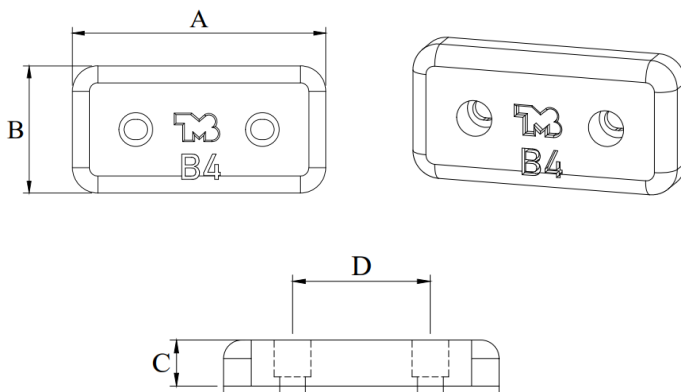
### 3.3 Pengumpulan Data dan Parameter Model

Data yang digunakan dalam penelitian ini diklasifikasikan menjadi dua kategori: data primer yang spesifik untuk proyek studi kasus dan data sekunder yang berasal dari standar industri dan literatur ilmiah.

#### 3.3.1 Data Spesifik Proyek (Input Primer)

##### A. Data Anoda Korban

Spesifikasi teknis anoda korban yang digunakan dalam sistem SACP diperoleh dari gambar teknik anoda yang digunakan pada *water box* kondensor PLTGU.



**Gambar 6. Anoda Korban**

(SUMBER: DOKUMEN TEKNIS ZINC ANODE PLTGU TANJUNG UNCANG)

- Massa Awal Anoda ( $M_{awal}$ ): 3.6 kg
- Dimensi Geometris: Panjang (A) = 200 mm, Lebar (B) = 100 mm, Tinggi (C) = 30 mm.

## B. Data Operasional Historis

Data operasional historis yang merepresentasikan kondisi lingkungan dinamis di dalam *water box* diperoleh dari sistem monitoring harian PLTGU Tanjung Uncang. Data ini dicatat dengan interval pencatatan setiap 2 jam (pukul 02.00, 04.00, hingga 24.00). Variabel deret waktu yang digunakan sebagai input untuk model dinamis adalah:

- Temperatur Air Pendingin ( $T_{hist}(t)$ ): Data dari sensor "Cooling Water Temp. (Inlet Condenser) Line A".
- Laju Aliran Air Pendingin ( $F_{hist}(t)$ ): Data dari sensor "Cooling Water Flow".

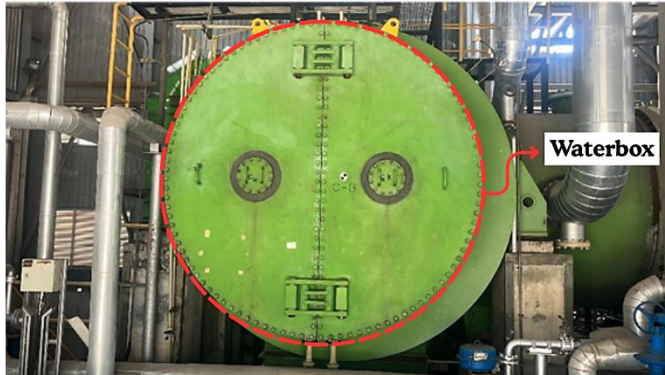
Contoh karakterisasi statistik dari data operasional pada periode tersebut disajikan pada gambar berikut.

**Tabel 3. Karakterisasi Data Operasional Historis**

| Anglo-ITRAMBIS-UNCANG-01-01                    |                   | MONITORING PARAMETERS COOLING WATER CONDENSER |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  <b>PLN</b><br>Batam |  |
|------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Rev. 02                                        |                   | 2-Mar-25                                      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                                                                                                       |  |
| Parameter                                      | Unit              | 2:00                                          | 4:00  | 6:00  | 8:00  | 10:00 | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 | 20:00 | 22:00 | 24:00 | Min   | Max   |                                                                                                       |  |
| <b>LOAD</b>                                    |                   |                                               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                                                                                                       |  |
| GT1                                            | MW                | 35                                            | 35    | 30    | 30    | 30    | 30    | 35    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 30    | 40    |                                                                                                       |  |
| GT2                                            | MW                | 35                                            | 35    | 35    | 35    | 35    | 35    | 40    | 45    | 40    | 45    | 45    | 45    | 35    | 45    |                                                                                                       |  |
| STG                                            | MW                | 32.5                                          | 32.4  | 31.4  | 31.6  | 31.79 | 31.81 | 33.4  | 35    | 33.9  | 35.2  | 35.1  | 35.1  | 31.4  | 35.2  |                                                                                                       |  |
| Ambient Temp.                                  | °C                | 27.3                                          | 27    | 27.1  | 28.2  | 30.2  | 30.6  | 31    | 32.4  | 29.7  | 28.4  | 27.9  | 27.6  | 27    | 32.4  |                                                                                                       |  |
| <b>COOLING WATER</b>                           |                   |                                               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Pump in Operation                | A/B               | B                                             | B     | B     | B     | B     | B     | B     | B     | B     | B     | B     | B     | 0     | 0     |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Flow                             | m <sup>3</sup> /h | 10344                                         | 10344 | 10344 | 10348 | 10344 | 10344 | 10344 | 10348 | 10344 | 10348 | 10348 | 10344 | 10344 | 10348 |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Temp. (Inlet Condenser) Line A   | °C                | 31                                            | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Temp. (Inlet Condenser) Line B   | °C                | 31                                            | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    | 31    |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Temp. (Outlet Condenser) Line A  | °C                | 40                                            | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Temp. (Outlet Condenser) Line B  | °C                | 40                                            | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Press. (Inlet Condenser) Line A  | bang              | 2                                             | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Press. (Inlet Condenser) Line B  | bang              | 2                                             | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Press. (Outlet Condenser) Line A | bang              | 1.4                                           | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   | 1.4   |                                                                                                       |  |
| Cooling Water Press. (Outlet Condenser) Line B | bang              | 1.7                                           | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   |                                                                                                       |  |
| Basin CT Temp.                                 | °C                |                                               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 0     |                                                                                                       |  |
| Inlet Cooling Tower water Temp                 | °C                |                                               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 0     |                                                                                                       |  |

## C. Parameter Desain *Water Box*

Untuk menghitung total permintaan arus proteksi diperlukan luas permukaan total dari *water box*. Luas permukaan *water box* pada kondensor PLTGU Tj. Uncang adalah 7,55 m<sup>2</sup>.



**Gambar 7. Water Box Kondensor PLTGU Tj. Uncang**

(SUMBER: DOKUMEN PRIBADI PLTGU TANJUNG UNCANG)

### 3.3.2. Parameter Berbasis Literatur dan Standar (Input Sekunder)

Untuk parameter yang tidak tersedia dari data spesifik proyek, nilainya diadopsi dari standar industri internasional dan publikasi ilmiah yang relevan.

#### A. Parameter Standar DNV-RP-B401

Standar DNV-RP-B401 merupakan rujukan utama dalam desain sistem proteksi katodik di industri maritim dan lepas pantai. Berikut adalah parameter yang diadopsi langsung dari standar ini untuk membangun model baseline:

- **Kapasitas Elektrokimia Seng ( $\epsilon$ ):** 780 Ah/kg. Merepresentasikan total muatan listrik yang dapat disuplai per satuan massa anoda seng.
- **Faktor Utilisasi ( $u$ ):** 0.85. Faktor ini mendefinisikan fraksi massa anoda yang dapat dikonsumsi secara efektif sebelum kinerjanya menurun akibat perubahan geometri.
- **Densitas Arus Proteksi ( $i_c$ ):** 0.070 A/m<sup>2</sup>. Nilai ini merupakan densitas arus rata-rata yang dibutuhkan untuk melindungi baja telanjang di lingkungan air laut tropis (>20°C).

#### B. Asumsi Model

Untuk meningkatkan akurasi fisika model, beberapa asumsi dan parameter tambahan diformulasikan berdasarkan studi literatur yang dapat dipertanggungjawabkan.

- **Model Degradasi Coating ( $f_c(t)$ ):** Degradasi lapisan pelindung (*coating*) epoxy dimodelkan menggunakan fungsi eksponensial untuk merepresentasikan proses non-linear dari penyerapan air dan penurunan sifat barrier dari waktu ke waktu. Model ini dipilih karena lebih akurat secara fisik dibandingkan model linear sederhana. Nilai parameter dipilih untuk merepresentasikan sistem *coating* epoxy berkualitas tinggi.
- **Faktor Koreksi Temperatur ( $F_T(t)$ ):** Ketergantungan laju korosi terhadap temperatur dimodelkan menggunakan persamaan Arrhenius. Energi aktivasi ( $E_a$ ) spesifik untuk disolusi seng di lingkungan air laut diadopsi dari studi eksperimental yang mengindikasikan bahwa proses korosi dikendalikan oleh mekanisme difusi.
- **Faktor Koreksi Aliran ( $F_F(t)$ ):** Pengaruh laju aliran air laut terhadap laju korosi dimodelkan menggunakan pendekatan *power-law*. Eksponen dalam model ini didasarkan pada analogi dengan korelasi perpindahan massa untuk aliran turbulen, yang secara dasar mengendalikan laju transpor oksigen ke permukaan katoda.
- **Parameter Variabilitas untuk Simulasi Monte Carlo:** Untuk merepresentasikan sifat stokastik dari proses korosi, variabilitas diperkenalkan pada parameter yang paling berpengaruh dan tidak pasti, yaitu densitas arus ( $i_c$ ) dan laju degradasi *coating*. Berdasarkan praktik *engineering judgment*, distribusi Normal dengan koefisien variasi (CV) sebesar 10% diasumsikan untuk kedua parameter ini.

Parameter-parameter berikut digunakan dalam penelitian ini berdasarkan asumsi yang diambil dari literatur dan standar terkait.

**Tabel 4. Parameter Model Berbasis Literatur dan Standar**

| <i>Simbol</i> | <i>Parameter</i>                   | <i>Nilai</i> | <i>Satuan</i>    | <i>Sumber</i>                                  |
|---------------|------------------------------------|--------------|------------------|------------------------------------------------|
| $\epsilon$    | Kapasitas Elektrokimia Seng        | 780          | Ah/kg            | <a href="#">DNV-RP-B401</a>                    |
| $u$           | Faktor Utilisasi Anoda             | 0.85         | -                | <a href="#">DNV-RP-B401</a>                    |
| $i_c$         | Densitas Arus Proteksi (rata-rata) | 0.070        | A/m <sup>2</sup> | <a href="#">DNV-RP-B401 (Tropis)</a>           |
| $f_{c,0}$     | Faktor Kerusakan Coating Awal      | 0.02         | -                | <a href="#">Asumsi Literatur (BS EN 13174)</a> |

|                             |                                       |        |        |                                                |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------|--------|------------------------------------------------|
| <b><math>b</math></b>       | <i>Laju Degradasi Coating</i>         | 0.01   | /tahun | <a href="#">Asumsi Literatur (BS EN 13174)</a> |
| <b><math>E_a</math></b>     | <i>Energi Aktivasi Korosi Seng</i>    | 27.43  | kJ/mol | <a href="#">Jurnal Ilmiah</a>                  |
| <b><math>T_{ref}</math></b> | <i>Temperatur Referensi Arrhenius</i> | 298.15 | K      | Standar Ilmiah                                 |
| <b><math>m</math></b>       | <i>Eksponen Faktor Aliran</i>         | 1      | -      | <a href="#">Asumsi Literatur</a>               |

### 3.4 Tahapan Pengembangan Model Simulasi Multi-Lapis

Model simulasi konsumsi anoda dikembangkan secara bertahap dalam tiga lapisan, masing-masing menambahkan tingkat kompleksitas dan realisme untuk menjawab tujuan penelitian.

#### 3.4.1 Layer 1: Model Deterministik (Baseline)

Langkah pertama dalam simulasi adalah membangun model *baseline* deterministik. Massa anoda efektif ( $M_{efektif}$ ) yang tersedia untuk proteksi dihitung terlebih dahulu menggunakan [Persamaan \(2.3\)](#). Input untuk  $M_{awal}$  (3.6 kg) diambil dari data spesifikasi teknis, dan  $u$  (0.85) diambil dari parameter standar yang disajikan pada [Tabel 3.2](#). Selanjutnya, permintaan arus *baseline* ( $I_{c,baseline}$ ) sebagai fungsi waktu dihitung menggunakan formulasi degradasi linear yang telah didefinisikan dalam [Persamaan \(2.4\)](#).

#### 3.4.2 Layer 2: Model Dinamis Berbasis Fisika

Model *baseline* statis tersebut kemudian disempurnakan menjadi model dinamis (Layer 2) untuk memperhitungkan fluktuasi lingkungan. Faktor koreksi temperatur ( $F_T(t)$ ) berbasis Arrhenius dan faktor koreksi aliran ( $F_F(t)$ ) berbasis *power-law* dihitung menggunakan [Persamaan \(2.6\)](#) dan [Persamaan \(2.7\)](#) secara berurutan. Kedua faktor koreksi ini kemudian digabungkan dengan model *baseline* untuk menghasilkan permintaan arus dinamis ( $I_{c,dinamis}$ ) sesuai dengan [Persamaan \(2.8\)](#). Akhirnya, konsumsi massa anoda dihitung secara iteratif untuk setiap langkah waktu ( $\Delta t$ ) menggunakan [Persamaan \(2.9\)](#) untuk kehilangan massa inkremental dan [Persamaan \(2.10\)](#) untuk massa total yang terkonsumsi. Proses ini merupakan penerapan iteratif dari prinsip kapasitas elektrokimia ( $\epsilon$ ) yang dijelaskan di Bab 2. Simulasi untuk satu iterasi berhenti ketika total massa yang terkonsumsi ( $W_{total}(t)$ ) mencapai atau melebihi massa efektif ( $M_{efektif}$ ). Waktu  $t$  pada saat kondisi ini tercapai dicatat sebagai *Time-To-Failure* (TTF) untuk iterasi tersebut.

### 3.4.3 Layer 3: Model Stokastik (Simulasi Monte Carlo)

Lapisan ketiga mentransformasikan model dinamis menjadi model probabilistik untuk mengkuantifikasi dampak dari ketidakpastian. Langkah ini dicapai dengan menerapkan simulasi Monte Carlo, di mana model dinamis yang dijelaskan di sub-bab 3.4.2 dieksekusi sebanyak  $N = 10.000$  kali untuk memastikan konvergensi statistik dari distribusi output. Pada setiap iterasi, parameter  $i_c$  dan  $b$  diambil sampelnya secara acak dari distribusi probabilitas yang dijelaskan pada [Tabel 3.2](#) untuk merefleksikan variabilitas dan sifat fisiknya. Keluaran dari proses ini bukan merupakan satu nilai umur pakai tunggal, melainkan sebuah distribusi empiris dari *Time-To-Failure* (TTF), yang merepresentasikan rentang hasil yang mungkin terjadi lengkap dengan probabilitas kemunculannya.

## 3.5 Kerangka Analisis Prediktif dan Perumusan Strategi

Data distribusi TTF yang dihasilkan oleh simulasi Monte Carlo dianalisis lebih lanjut untuk mengekstrak wawasan prediktif dan merumuskan strategi pemeliharaan yang optimal.

### 3.5.1 Analisis Keandalan dan Prediksi RUL

Data distribusi TTF yang dihasilkan oleh 10.000 iterasi simulasi Monte Carlo kemudian dianalisis. Distribusi ini di-*fitting* menggunakan distribusi Weibull 2-parameter untuk memodelkan probabilitas kegagalan. Fungsi Keandalan ( $R(t)$ ), yang didefinisikan dalam [Persamaan \(2.11\)](#), digunakan untuk mengkuantifikasi probabilitas sistem bertahan hingga waktu  $t$ . Hasil analisis ini menjadi dasar untuk prediksi RUL, di mana strategi pemeliharaan dapat ditetapkan berdasarkan ambang batas keandalan yang dapat diterima.

### 3.5.2 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA)

Untuk memberikan justifikasi finansial, dilakukan Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA). Analisis ini membandingkan skenario TBM dan PdM menggunakan formulasi biaya yang telah dijelaskan pada [Persamaan \(2.12\)](#) untuk LCC TBM dan [Persamaan \(2.13\)](#) untuk LCC PdM. Nilai probabilitas kegagalan ( $P_{fail}$ ) untuk skenario TBM diambil dari kurva keandalan yang dihasilkan pada langkah 3.5.1. Perbandingan LCC dari kedua skenario ini akan memberikan justifikasi kuantitatif untuk adopsi strategi PdM.

## 3.6 Perangkat Lunak Penelitian (Tools and Software)

Implementasi metodologi komputasi ini akan memanfaatkan serangkaian perangkat lunak standar industri dan akademik.

### 3.6.1 Platform Komputasi Utama

MATLAB akan digunakan sebagai *software* komputasi utama untuk penelitian ini. Pemilihan ini didasarkan pada kapabilitasnya yang kuat dalam komputasi numerik, analisis statistik, dan visualisasi data. Penggunaan MATLAB akan mencakup:

- Pengembangan dan implementasi ketiga lapisan model simulasi (Deterministik, Dinamis, Stokastik).
- Eksekusi simulasi Monte Carlo dengan jumlah iterasi yang besar.
- Analisis statistik pada data hasil simulasi, termasuk *fitting* distribusi Weibull.

*Toolbox* spesifik yang akan digunakan adalah *Statistics and Machine Learning Toolbox*, yang menyediakan fungsi-fungsi esensial untuk analisis distribusi probabilitas, *fitting* model statistik, dan analisis keandalan.

### 3.6.2 Perangkat Lunak Pendukung

Microsoft Excel® digunakan untuk tugas-tugas pra-pengolahan data, termasuk ekstraksi, pemformatan, dan tabulasi data operasional historis dari *log sheet* sistem monitoring sebelum data tersebut diimpor ke dalam lingkungan MATLAB untuk analisis lebih lanjut.

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

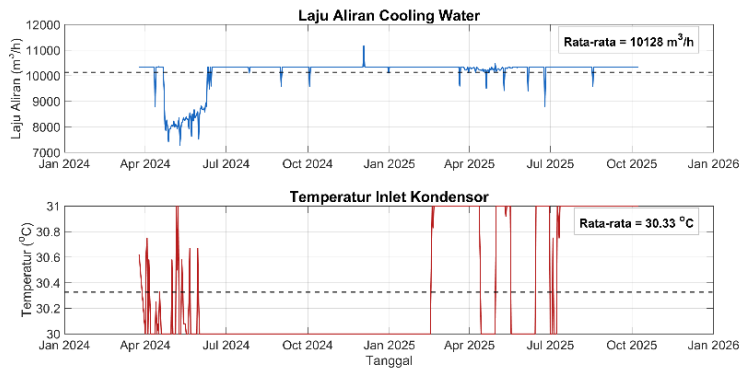
4.1 Karakteristik Lingkungan Operasional Kondensor

Data monitoring harian kondensor yang telah melalui proses validasi menghasilkan 534 titik data simultan untuk laju aliran dan temperatur *inlet*. Rangkuman statistiknya disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rangkuman Statistik Data Monitoring Operasional Kondensor

| Parameter                       | Data Valid (hari) | Rata-rata | Std. Deviasi | Minimum | Maksimum |
|---------------------------------|-------------------|-----------|--------------|---------|----------|
| Laju Aliran (m <sup>3</sup> /h) | 534               | 10.127,55 | ~1.044       | ~6.500  | ~11.800  |
| Temperatur Inlet (°C)           | 534               | ~30,0     | ~0,9         | ~27,8   | ~32,2    |

Distribusi temporal kedua parameter ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Distribusi temporal laju aliran air pendingin dan temperatur inlet kondensor selama periode monitoring.

4.1.1 Implikasi Temperatur Tropis terhadap Kinetika Korosi

Temperatur *inlet* rata-rata tercatat sebesar ~30°C(303K), yang berada 5°C di atas temperatur referensi 25°C(298,15K) dalam standar DNV-RP-B401. Perbedaan ini memiliki konsekuensi yang jauh melampaui proporsionalitas linear.

Menurut teori kinetika Arrhenius, laju reaksi elektrokimia, termasuk reaksi oksidasi anoda dan reduksi oksigen pada katoda, meningkat

secara **eksponensial** terhadap temperatur. Dengan energi aktivasi korosi sebesar  $27.430 \text{ J/mol}$ , selisih  $5^\circ\text{C}$  menghasilkan percepatan korosi yang substansial karena sifat hubungan eksponensial tersebut.

Sifat percepatan ini bersifat **persisten dan unidireksional**: temperatur air laut tropis Indonesia secara konsisten berada di atas referensi standar sepanjang tahun, tanpa adanya periode musim dingin yang mengompensasi. Standar DNV-RP-B40, yang dikembangkan untuk kondisi iklim global yang lebih moderat, tidak mengakomodasi kondisi tropis secara eksplisit, sehingga penerapannya pada fasilitas pembangkit di wilayah khatulistiwa berpotensi menghasilkan estimasi umur pakai yang tidak konservatif.

Lebih jauh, temperatur  $30^\circ\text{C}$  merupakan rata-rata; nilai maksimum tercatat  $\sim 32,2^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = 7,2^\circ\text{C}$  dari referensi), yang pada kondisi puncak menghasilkan percepatan korosi mendekati 30%. Meskipun episodik, kejadian-kejadian puncak ini berkontribusi secara kumulatif terhadap degradasi anoda dan tidak dapat diabaikan dalam estimasi umur pakai.

#### 4.1.2 Variabilitas Laju Aliran dan Pengaruhnya terhadap Perpindahan Massa

Laju aliran air pendingin menunjukkan rata-rata  $10.127,55 \text{ m}^3/\text{h}$  dengan koefisien variasi  $\sim 10,3$  (standar deviasi  $\sim 1.044 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Variabilitas ini mencerminkan dinamika operasional pembangkit: variasi beban listrik, pola pengoperasian pompa sirkulasi, dan kemungkinan penurunan efisiensi aliran akibat *fouling* pada penukar panas.

Dari perspektif elektrokimia korosi, laju aliran memengaruhi laju perpindahan massa oksigen terlarut menuju permukaan katoda. Menurut model *Power-Law*, peningkatan aliran meningkatkan pasokan oksigen dan mempercepat reaksi katodik, yang pada gilirannya menarik lebih banyak arus dari anoda. Namun, karena fluktuasi aliran bersifat simetris di sekitar nilai rata-rata, faktor koreksi aliran agregat mendekati  $F_F \approx 1,0$ . Artinya, aliran berbeda dengan temperatur, **tidak memberikan percepatan netto** terhadap korosi dalam jangka panjang.

Meskipun demikian, variabilitas aliran menambah **ketidakpastian** pada prediksi umur pakai. Dua mekanisme berperan:

1. Pada hari-hari dengan aliran rendah ( $\sim 6.500 \text{ m}^3/\text{h}$ ), kondisi stagnasi lokal dapat menyebabkan *pitting* dan korosi celah.
2. Pada hari-hari dengan aliran tinggi ( $\sim 11.800 \text{ m}^3/\text{h}$ ), abrasi mekanis pada *coating* dapat mempercepat degradasinya.

Kedua efek ini sulit ditangkal oleh model deterministik dan menjadi salah satu justifikasi penggunaan pendekatan stokastik pada analisis selanjutnya.

#### 4.1.3 Sintesis: Profil Agresivitas Lingkungan

Data monitoring mengonfirmasi bahwa *water box* kondensor PLTGU Tanjung Uncang beroperasi dalam lingkungan korosi yang secara inheren lebih agresif dibandingkan asumsi desain standar. Profil agresivitas ini ditandai oleh:

1. **Temperatur tropis persisten** ( $\sim 30^{\circ}\text{C}$ ) yang secara eksponensial mempercepat kinetika korosi di atas asumsi standar.
2. **Variabilitas aliran harian** yang tinggi (CV  $\sim 10,3$ ), yang menambah ketidakpastian meskipun tidak memberikan percepatan netto.

Kombinasi kedua faktor ini mengimplikasikan bahwa prediksi umur pakai anoda berdasarkan parameter standar saja akan bersifat **overestimasi**, dan koreksi berbasis fisika yang memperhitungkan kondisi lokal menjadi kebutuhan analitis yang mendasar.

#### 4.2 Simulasi Deterministik Baseline: Benchmark Umur Pakai Ideal

Model deterministik baseline (Layer 1) yang dikembangkan berdasarkan formulasi pada Bab 3 dijalankan menggunakan parameter pada Tabel 6 untuk menghasilkan estimasi umur pakai anoda pada **kondisi ideal** menurut standar DNV-RP-B401. Hasil utamanya dirangkum pada Tabel 7.

**Tabel 6. Parameter Input Model Deterministik Baseline**

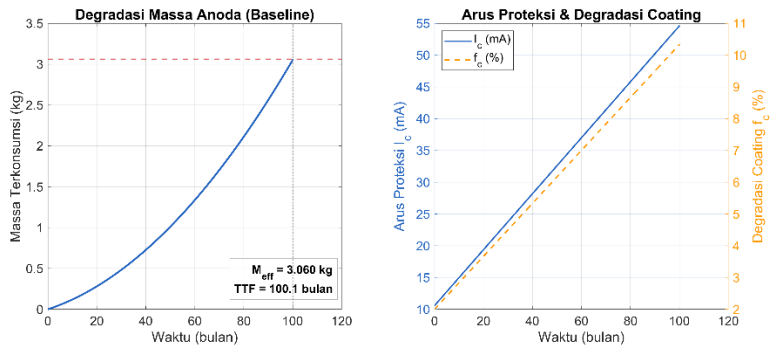
| Parameter                       | Simbol               | Nilai     | Satuan         | Sumber             |
|---------------------------------|----------------------|-----------|----------------|--------------------|
| Luas permukaan <i>water box</i> | $A_c$                | 7,55      | $\text{m}^2$   | Data teknis PLTGU  |
| Densitas arus proteksi (tropis) | $i_{c\text{design}}$ | 0,070     | $\text{A/m}^2$ | DNV-RP-B401        |
| Kapasitas elektrokimia seng     | $\varepsilon$        | 780       | $\text{Ah/kg}$ | DNV-RP-B401        |
| Massa awal anoda                | $M_{\text{awal}}$    | 3,6       | kg             | Spesifikasi TMB B4 |
| Faktor utilisasi                | $u$                  | 0,85      | —              | DNV-RP-B401        |
| Coating breakdown awal (ideal)  | $FC^0$               | 0,02 (2%) | —              | DNV-RP-B401        |
| Laju degradasi coating          | $b$                  | 0,01      | /tahun         | Literatur          |

**Tabel 7. Hasil Simulasi Model Deterministik Baseline (Layer 1)**

| Parameter Output                                                    | Nilai        | Satuan       |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Massa efektif anoda ( $M_{\text{eff}} = M_{\text{awal}} \times u$ ) | 3,060        | kg           |
| Time-to-Failure (TTF)                                               | <b>8,345</b> | <b>tahun</b> |
| TTF dalam bulan                                                     | 100,1        | bulan        |

|                                          |        |      |
|------------------------------------------|--------|------|
| TTF dalam hari                           | 3.048  | hari |
| Arus proteksi awal ( $t = 0$ )           | 10,57  | mA   |
| Arus proteksi akhir ( $t = \text{TTF}$ ) | 54,65  | mA   |
| Faktor <i>coating breakdown</i> awal     | 2,00%  | —    |
| Faktor <i>coating breakdown</i> akhir    | 10,34% | —    |

Visualisasi kurva degradasi massa dan evolusi arus proteksi disajikan pada Gambar 9.



**Gambar 9. Hasil Simulasi Layer 1: (a) kurva degradasi massa anoda terhadap waktu, dan (b) evolusi arus proteksi katodik serta faktor coating breakdown**

#### 4.2.1 Fenomena Percepatan Degradasi Non-Linear

Kurva degradasi massa pada Gambar 9a menunjukkan pola **non-linear progresif**, laju konsumsi massa anoda semakin cepat seiring waktu. Pola ini, meskipun dihasilkan dari model *coating breakdown* yang bersifat linear ( $f_c$  meningkat konstan 1% per tahun), merupakan konsekuensi dari hubungan **multiplikatif** antara variabel-variabel yang terlibat.

Mekanismenya dapat ditelusuri secara kausal:

1. Degradasi *coating* meningkatkan area permukaan baja yang terekspos.
2. Area terekspos yang lebih besar menarik arus proteksi yang lebih besar dari anoda.
3. Arus yang lebih besar mengonsumsi massa anoda lebih cepat per satuan waktu.

Karena  $I_c = A_c \times i_c \times f_c$  merupakan fungsi langsung dari  $f_c$  yang terus naik, konsumsi massa per langkah waktu ( $\Delta W = I_c \times \Delta t / \varepsilon$ ) juga terus meningkat.

Interaksi ini mengubah *degradasi \_coating* yang linear menjadi konsumsi massa yang **kuadratik**, sebagaimana ditunjukkan oleh data pada Tabel 8.

**Tabel 8. Evolusi Laju Konsumsi Anoda Sepanjang Masa Pakai**

| Tahun Operasi | $f_c$ | $I_c$ (mA) | Konsumsi Harian (gram) | Massa Kumulatif (kg) | % $M_{eff}$ |
|---------------|-------|------------|------------------------|----------------------|-------------|
| 0             | 0,020 | 10,57      | 0,325                  | 0,000                | 0,0%        |
| 1             | 0,030 | 15,86      | 0,488                  | 0,145                | 4,7%        |
| 2             | 0,040 | 21,14      | 0,651                  | 0,356                | 11,6%       |
| 3             | 0,050 | 26,43      | 0,813                  | 0,632                | 20,7%       |
| 5             | 0,070 | 37,00      | 1,138                  | 1,081                | 35,3%       |
| 7             | 0,090 | 47,57      | 1,464                  | 1,898                | 62,0%       |
| 8,345         | 0,103 | 54,65      | 1,682                  | 3,060                | 100%        |

Tabel 8. mengungkapkan distribusi konsumsi massa yang **asimetris secara temporal**:

- Dalam **5 tahun pertama** (60% masa pakai): baru **35,3%** massa efektif yang terkorosi.
- Dalam **3,3 tahun terakhir** (40% masa pakai): **64,7%** sisa massa habis seluruhnya.

Asimetri ini memiliki dua implikasi penting:

1. **Implikasi diagnostik.** Inspeksi visual pada pertengahan masa pakai (tahun ke-4 atau ke-5) akan memberikan kesan yang **menyesatkan**. Anoda yang masih tampak memiliki ~65% massa sebenarnya telah memasuki zona percepatan dengan laju konsumsi harian 3,5× lebih tinggi dari kondisi awal. Keputusan penggantian yang hanya didasarkan pada inspeksi visual berisiko terlambat.
2. **Implikasi prediktif.** Estimasi sisa umur menggunakan laju konsumsi rata-rata konstan (*linear extrapolation*) akan secara sistematis **meng-overestimasi** sisa umur pakai. Sebagai ilustrasi: jika pada tahun ke-5 diketahui bahwa 35% massa sudah habis, estimasi linear memprediksi sisa 9,3 tahun, yang padahal kenyataannya hanya 3,3 tahun karena laju konsumsi terus meningkat.

#### 4.2.2 *Coating* sebagai Parameter Pengendali Utama

Gambar 9b mengonfirmasi bahwa **integritas *coating*** merupakan **variabel pengendali tunggal** yang paling menentukan dinamika konsumsi anoda. Hubungan kausal yang ditunjukkan oleh grafik *dual-axis* bersifat langsung: setiap

peningkatan  $f_c$  menyebabkan peningkatan proporsional pada  $I_c$ , yang kemudian meningkatkan laju konsumsi massa.

Temuan ini mengimplikasikan bahwa **kualitas *coating* awal ( $FC_0$ ) lebih kritis daripada spesifikasi material anoda** dalam menentukan umur pakai sistem proteksi. Sebuah anoda dengan massa besar yang dipasang pada *water box* dengan *coating* terdegradasi parah akan habis jauh lebih cepat dibandingkan anoda kecil pada *coating* yang masih baik.

Selama rentang simulasi,  $f_c$  meningkat dari 2% menjadi 10,34%. Meskipun angka absolut ini tampak kecil, dampaknya sangat besar karena bekerja secara multiplikatif:

- Peningkatan  $f_c$  sebesar **5×** (dari 2% ke 10%)
- Peningkatan  $I_c$  sebesar **5×** (dari 10,57 ke 54,65 mA)
- Peningkatan laju konsumsi massa sebesar **5×** selama masa operasi.

#### 4.2.3 Signifikansi TTF 100,1 Bulan

TTF = 100,1 bulan (~8,3 tahun) merepresentasikan **batas atas teoretis** umur pakai anoda seng 3,6 kg pada konfigurasi *water box* PLTGU Tanjung Uncang, sebuah skenario dimana *coating* dalam kondisi ideal ( $FC_0 = 2\%$ ), temperatur sesuai standar (25°C), dan tidak ada variabilitas parameter.

Nilai ini berfungsi sebagai *benchmark* kuantitatif dalam dua konteks:

1. **Evaluasi pengaruh lingkungan.** Setiap reduksi TTF yang dihasilkan oleh model-model yang memperhitungkan kondisi aktual dapat diukur sebagai deviasi dari *baseline* ini. Besarnya deviasi menunjukkan seberapa signifikan faktor lingkungan lokal memengaruhi umur pakai anoda.
2. **Pembandingan terhadap kondisi lapangan.** Kesenjangan antara TTF ideal dan durasi operasional nyata menjadi indikator apakah terdapat faktor-faktor di luar asumsi standar yang mendominasi perilaku degradasi.

### 4.3 Model Dinamis Berbasis Fisika: Pengaruh Temperatur dan Aliran Aktual

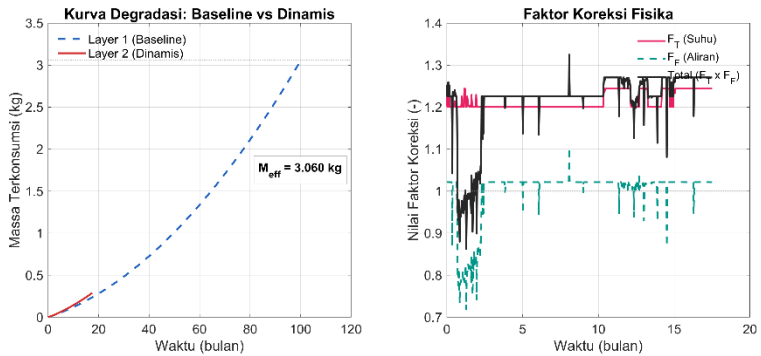
Model deterministik baseline mengasumsikan seluruh parameter lingkungan konstan dan sesuai standar. Pada kenyataannya, temperatur dan laju aliran bervariasi setiap hari. Model dinamis (Layer 2) memperluas model baseline dengan dua mekanisme koreksi fisika, Arrhenius untuk temperatur dan *Power-*

Law untuk aliran, yang diterapkan secara harian menggunakan 534 titik data monitoring aktual, sebagaimana diformulasikan pada Bab 3 (Sub-bab 3.4.2).

Hasil kuantitatif disajikan pada Tabel 9.

**Tabel 9. Hasil Simulasi Model Dinamis (Layer 2)**

| Parameter Output                                | Nilai  | Satuan |
|-------------------------------------------------|--------|--------|
| Jumlah data aktual yang diproses                | 534    | hari   |
| Faktor koreksi temperatur rata-rata ( $F_T$ )   | 1,2145 | —      |
| Faktor koreksi aliran rata-rata ( $F_F$ )       | 1,0000 | —      |
| Arus proteksi dinamis rata-rata ( $I_{c,dyn}$ ) | 17,62  | mA     |



**Gambar 10. Hasil Simulasi Layer 2: (a) perbandingan kurva degradasi massa model dinamis vs baseline, dan (b) distribusi temporal faktor koreksi temperatur ( $F_T$ ) dan aliran ( $F_F$ )**

Untuk mengilustrasikan bagaimana simulasi model dinamis bekerja pada data aktual, berikut contoh perhitungan pada **hari ke-100 monitoring** dengan kondisi operasional: temperatur *inlet* = 31,5°C dan laju aliran = 9.200 m<sup>3</sup>/h.

**Langkah 1: Arus baseline (identik dengan Layer 1):**

$$Waktusimulasi: t = 100 \times \left( \frac{24}{24 \times 365,25} \right) = 0,2738 \text{ tahun}$$

$$f_{c(0,2738)} = 0,02 + 0,01 \times 0,2738 = 0,02274$$

$$I_{c(baseline)} = 7,55 \times 0,070 \times 0,02274 = \mathbf{12,02 \text{ mA}}$$

**Langkah 2: Faktor koreksi temperatur (Arrhenius):**

$$T_K = 31,5 + 273,15 = 304,65 \text{ K}$$

Argumen eksponen:

$$\begin{aligned}\frac{1}{T_K} - \frac{1}{T_{ref}} &= \frac{1}{304,65} - \frac{1}{298,15} \\ \frac{1}{T_K} - \frac{1}{T_{ref}} &= 0,003282 - 0,003354 \\ \frac{1}{T_K} - \frac{1}{T_{ref}} &= -7,20 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1} \\ -\left(\frac{E_a}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T_K} - \frac{1}{T_{ref}}\right) &= -\left(\frac{27.430}{8,314}\right) \times (-7,20 \times 10^{-5}) = +0,2376 \\ F_T &= \exp(0,2376) = e^{0,2376} = 1,2683\end{aligned}$$

Temperatur 31,5°C (6,5°C di atas referensi) mempercepat korosi sebesar 26,8% pada hari ini.

**Langkah 3: Faktor koreksi aliran (Power-Law):**

$$F_F = \left(\frac{v}{v_{ref}}\right)^m = \left(\frac{9,200}{10.127,55}\right)^{1,0} = 0,9084$$

Aliran yang bernilai 9,2% di bawah rata-rata ini secara proporsional memperlambat laju korosi sebesar 9,2% (karena eksponen  $m = 1,0$ ).

**Langkah 4: Arus dinamis dan konsumsi massa:**

**1. Perhitungan Arus Dinamis ( $I_{c,dyn}$ ):**

$$\begin{aligned}I_{c,dyn} &= I_{c,baseline} \times F_T \times F_F \\ I_{c,dyn} &= 12,02 \times 1,2683 \times 0,9084 = 13,85 \text{ m}\end{aligned}$$

**2. Perhitungan Konsumsi Massa ( $\Delta W_{dyn}$ ):**

$$\begin{aligned}\Delta W_{dyn} &= \frac{I_{c,dyn} \times 10^{-3} \times 24}{780} \\ \Delta W_{dyn} &= \frac{13,85 \times 10^{-3} \times 24}{780} = 0,426 \text{ gram}\end{aligned}$$

**Tabel 10. Perbandingan Layer 1 vs Layer 2 pada hari ke-100**

| Parameter             | Layer 1 (Baseline) | Layer 2 (Dinamis) | Selisih |
|-----------------------|--------------------|-------------------|---------|
| Arus proteksi         | 12,02 mA           | 13,85 mA          | +15,2%  |
| Konsumsi massa harian | 0,370 gram         | 0,426 gram        | +15,2%  |

Pada hari ini, efek temperatur (+26,8%) dan efek aliran (-9,2%) saling berkompetisi, dengan hasilnya yang tetap didominasi oleh percepatan temperatur. Pola kompetisi serupa terjadi pada setiap hari monitoring, menghasilkan distribusi  $F_T$  dan  $F_F$  yang terlihat pada Gambar 10.b. Ketika dirata-ratakan selama 534 hari, interaksi kedua faktor ini mengonvergensi menuju  $F_T = 1,2145$  dan  $F_F = 1,0000$  sebagaimana tercantum pada Tabel 9.

#### 4.3.1 Dominasi Efek Temperatur Tropis

Faktor koreksi temperatur rata-rata  $F_T = 1,2145$  menunjukkan bahwa kondisi temperatur aktual mempercepat laju korosi anoda sebesar **21,5%** relatif terhadap asumsi standar.

Percepatan ini berasal dari hubungan eksponensial Arrhenius antara temperatur dan laju reaksi elektrokimia. Pada temperatur rata-rata 30°C (303 K), 5°C di atas referensi 25°C (298,15 K), energi kinetik molekuler meningkat cukup signifikan untuk mempercepat reaksi oksidasi seng pada anoda dan reaksi reduksi oksigen pada katoda. Besaran 21,5% ini konsisten dengan nilai energi aktivasi korosi seng ( $E_a = 27.430$  J/mol) yang dilaporkan dalam literatur.

Tiga aspek memperkuat signifikansi temuan ini:

1. **Sifat kumulatif.** Percepatan 21,5% terakumulasi setiap hari operasi dan efeknya bertambah secara *compounding* selama bertahun-tahun.
2. **Variabilitas puncak.**  $F_T = 1,2145$  merupakan rata-rata; pada temperatur puncak ~32,2°C, faktor koreksi mencapai ~1,29 (percepatan ~30%).
3. **Tidak ada kompensasi.** Berbeda dengan iklim subtropis yang memiliki musim dingin, temperatur perairan tropis Indonesia secara **konsisten** berada di atas referensi standar, tidak ada periode yang memperlambat korosi di bawah *baseline*.

Standar DNV-RP-B401 yang dirancang untuk iklim moderat menjadi **tidak konservatif** dalam lingkungan ini: massa anoda yang dihitung tanpa koreksi temperatur lokal akan menghasilkan estimasi umur pakai yang terlalu optimistik.

#### 4.3.2 Netralitas Agregat Faktor Aliran

Faktor koreksi aliran rata-rata  $F_F = 1,0000$  menunjukkan bahwa secara agregat, variabilitas laju aliran **tidak memberikan percepatan maupun perlambatan netto**. Hasil ini merupakan konsekuensi matematis: referensi  $v_{ref}$  dihitung dari rata-rata data itu sendiri, sehingga fluktuasi saling meniadakan dalam jangka panjang.

Namun, netralitas agregat ini menyembunyikan dinamika harian yang signifikan. Gambar 5.3b memperlihatkan  $F_F$  berfluktuasi dalam rentang ~0,64–

1,17 (variasi  $\pm 36\%$ ), jauh lebih volatil dibandingkan  $F_T$  yang relatif stabil di sekitar 1,21. Fluktuasi ini mencerminkan variasi beban operasional pembangkit.

Implikasi dari volatilitas ini bersifat **stokastik**: *FF tidak memengaruhi prediksi TTF secara deterministik, tetapi menambah **varians** pada distribusi TTF. Pada hari-hari dengan  $F_F$  tinggi bersamaan dengan  $F_T$  tinggi, terjadi efek gabungan (compound effect) yang mempercepat korosi melampaui rata-rata; sebaliknya, kombinasi keduanya yang rendah menghasilkan hari-hari dengan laju korosi di bawah baseline.*

### 4.3.3 Interpretasi Perbandingan Kurva Layer 1 dan Layer 2

Gambar 10.a menunjukkan kurva massa Layer 2 (garis merah) berada **di bawah** kurva Layer 1 (garis biru). Fenomena ini tampak bertentangan dengan percepatan 21,5%, namun penjelasannya terletak pada **perbedaan skala temporal**:

- **Layer 1** mensimulasikan seluruh horizon 10 tahun dengan loop sintesis, kurva biru mencapai  $M_{eff}$  pada bulan ke-100,1.
- **Layer 2** hanya mensimulasikan selama data monitoring tersedia, yaitu **534 hari** ( $\sim 1,46$  tahun). Dalam periode yang masih sangat awal ini, massa kumulatif yang terkonsumsi jauh dari ambang  $M_{eff} = 3,060$  kg, sehingga perbedaan antara kedua model belum terlihat secara visual.

Keterbatasan ini mencerminkan realitas ketersediaan data: data monitoring operasional umumnya tidak tersedia untuk seluruh umur pakai anoda. Kontribusi utama Layer 2 bukan sebagai prediktor TTF langsung, melainkan sebagai **alat kuantifikasi faktor koreksi fisika**, nilai  $F_T$  dan  $F_F$  yang diekstrak dari 534 hari data aktual inilah yang dipropagasi ke model stokastik sebagai input parameter.

### 4.3.4 Hierarki Faktor Percepatan Korosi

Berdasarkan hasil model dinamis, hierarki pengaruh faktor lingkungan terhadap laju konsumsi anoda dapat dirangkum sebagai berikut:

**Tabel 11. Hierarki Faktor Percepatan Korosi**

| Peringkat | Faktor              | Besaran Koreksi                        | Sifat                     | Kontribusi                                          |
|-----------|---------------------|----------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>1</b>  | Temperatur tropis   | $F_T = 1,2145$<br>(+21,5%)             | Persisten, unidireksional | Percepatan netto dominan                            |
| <b>2</b>  | Variabilitas aliran | $F_F = 1,0000$<br>( $\pm 36\%$ harian) | Fluktuatif, simetris      | Tidak ada percepatan netto; menambah ketidakpastian |

Dalam konteks proteksi katodik *water box* kondensor di lingkungan tropis, **temperatur merupakan faktor yang paling kritis** untuk diperhitungkan dalam koreksi standar desain. Variabilitas aliran, meskipun signifikan secara harian, bersifat *self-compensating* dalam jangka panjang.

Implikasi praktisnya: upaya rekayasa untuk memperpanjang umur pakai anoda akan lebih efektif jika difokuskan pada mitigasi efek temperatur, misalnya melalui peningkatan kapasitas pendinginan atau pemilihan material anoda dengan energi aktivasi yang lebih tinggi, daripada pada pengendalian variabilitas aliran.

## 4.4 Simulasi Monte Carlo dan Analisis Keandalan Weibull

Model deterministik (Layer 1) menghasilkan satu nilai TTF tunggal (100,1 bulan) berdasarkan parameter nominal. Model dinamis (Layer 2) menambahkan koreksi fisika ( $FT = 1,2145$ ;  $F_F = 1,0$ ) namun tetap menghasilkan estimasi deterministik. Kedua model ini belum mengakomodasi fakta bahwa parameter-parameter seperti densitas arus proteksi ( $i_c$ ) dan laju degradasi coating (b) memiliki variabilitas inheren, yang berasal dari perbedaan kualitas material anoda antar *batch*, variasi konduktivitas elektrolit, kondisi permukaan katoda, serta kualitas aplikasi *coating* yang tidak pernah seragam sempurna.

Model stokastik (Layer 3) mengakomodasi variabilitas ini melalui simulasi Monte Carlo: setiap iterasi menjalankan model degradasi lengkap (*loop* waktu harian hingga  $W(t) \geq M_{eff}$ ) dengan sampel parameter ( $i_{cb}$ ) yang ditarik secara acak dari distribusi statistiknya. Dengan 10.000 iterasi, hasilnya bukan satu nilai TTF, melainkan **distribusi TTF** yang menggambarkan seluruh spektrum kemungkinan umur pakai. Distribusi ini kemudian dianalisis menggunakan distribusi Weibull untuk menghasilkan metrik keandalan (*reliability*) yang langsung dapat digunakan dalam perencanaan pemeliharaan.

### 4.4.1 Konfigurasi Parameter Stokastik

Dua parameter divariasikan secara stokastik menggunakan distribusi Normal dengan koefisien variasi (CV) 10%, yang konsisten dengan rentang variabilitas parameter korosi yang dilaporkan dalam literatur (5–15% untuk lingkungan terkontrol):

**Tabel 12. Parameter Stokastik Simulasi Monte Carlo**

| Parameter                        | Distribusi | Rata-rata ( $\mu$ )    | Standar Deviasi ( $\sigma$ ) | CV  | Justifikasi                          |
|----------------------------------|------------|------------------------|------------------------------|-----|--------------------------------------|
| Densitas arus proteksi ( $i_c$ ) | Normal     | 0,070 A/m <sup>2</sup> | 0,007 A/m <sup>2</sup>       | 10% | Variabilitas material dan elektrolit |

|                                          |        |              |              |     |                                               |
|------------------------------------------|--------|--------------|--------------|-----|-----------------------------------------------|
| <b>Laju degradasi <i>coating</i> (b)</b> | Normal | 0,010 /tahun | 0,001 /tahun | 10% | Variabilitas kualitas aplikasi <i>coating</i> |
|------------------------------------------|--------|--------------|--------------|-----|-----------------------------------------------|

Sampel negatif yang secara fisika tidak valid di-clip ke nilai positif minimum ( $10^{-6}$ ). Faktor koreksi temperatur ditetapkan konstan pada nilai rata-rata dari Layer 2 ( $F_T = 1,1950$  untuk  $T_{mean} = 303K$ ), sedangkan  $F_F = 1,0$  karena efek aliran bersifat netral secara agregat.

#### 4.4.2 Contoh Perhitungan: Trace Satu Iterasi Monte Carlo

Setiap iterasi Monte Carlo bukan sekadar substitusi parameter ke dalam satu rumus, setiap iterasi menjalankan **loop waktu lengkap** (~2.500–3.500 langkah harian) hingga massa terkonsumsi mencapai  $M_{eff}$ . Berikut trace satu iterasi ( $k = 1$ ) untuk mengilustrasikan mekanisme ini.

##### Langkah 1: Sampling parameter:

Berdasarkan hasil dari generator bilangan acak (dengan *seed* = 42), diperoleh parameter sampel sebagai berikut:

- **Kerapatan Arus Korosi ( $i_c$ ):**

$$i_c = 0,0735 \text{ A/m}^2 \quad (\approx 5\% \text{ di atas } \mu)$$

- **Laju Penetrasi ( $b$ ):**

$$b = 0,0112/\text{tahun} \quad (\approx 12\% \text{ di atas } \mu)$$

Karena kedua nilai sampel bernilai positif ( $\$ > 0\$$ ), maka tidak diperlukan tindakan *clipping* (pemotongan nilai negatif) pada distribusi probabilitas ini.

##### Langkah 2: Faktor Koreksi Konstan (dari Layer 2):

Perhitungan faktor koreksi suhu ( $F_T$ ) menggunakan persamaan Arrhenius dengan suhu operasional  $T = 303 \text{ K}$ :

##### 1. Perhitungan Argumen Eksponen:

$$\text{Arg} = -\left(\frac{E_a}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)$$

$$\text{Arg} = -\left(\frac{27.430}{8,314}\right) \times \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{298,15}\right) = 0,1782$$

##### 2. Perhitungan Faktor Koreksi ( $F_T$ ):

$$F_T = \exp(0,1782) = e^{0,1782} = 1,1950$$

**Tabel 13. Langkah 3: Loop waktu internal (langkah-langkah kritis)**

| Waktu (tahun) | $f_c$  | $I_{c, \text{baseline}}$ (mA) | $I_{c, \text{dinamis}}$ (mA) | $\Delta W$ (gram/hari) | W kumulatif (kg) |
|---------------|--------|-------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------|
| 0             | 0,0200 | 11,09                         | 13,25                        | 0,408                  | 0,000            |
| 1             | 0,0312 | 17,31                         | 20,69                        | 0,637                  | ~0,175           |
| 5             | 0,0760 | 42,17                         | 50,39                        | 1,551                  | ~1,355           |
| ~7,1          | 0,0995 | 55,20                         | 65,96                        | 2,030                  | ~3,060 → TTF!    |

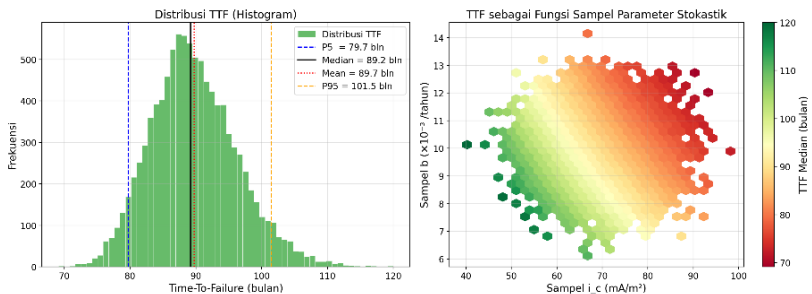
Pada  $t \approx 7,1$  tahun,  $W$  mencapai  $M_{eff} = 3,060$  kg → **TTF[1] = 7,1 tahun (85,2 bulan)**.

#### Langkah 4: Agregasi 10.000 iterasi:

Proses di atas diulang 10.000 kali, masing-masing dengan sampel ( $i_c, b$ ) yang unik. Total langkah komputasi  $\approx 10.000 \times \sim 3.000$  langkah =  $\sim 30$  juta evaluasi persamaan. Setiap iterasi menghasilkan satu TTF, yang secara kolektif membentuk distribusi TTF.

#### 4.4.3 Hasil Simulasi Monte Carlo

Histogram distribusi TTF dan *scatter plot* hubungan parameter stokastik terhadap TTF disajikan pada gambar berikut.



**Gambar 11. Hasil Simulasi Monte Carlo: (a) histogram distribusi 10.000 sampel TTF, dan (b) scatter plot hubungan antara parameter stokastik ( $i_c, b$ ) dengan TTF yang dihasilkan**

Hasil tersebut dapat dirangkum pada Tabel 11. berikut.

**Tabel 14. Statistik Distribusi TTF dari Simulasi Monte Carlo (10.000 Iterasi)**

| Statistik                       | Nilai (tahun)      | Nilai (bulan)         |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------|
| <b>Rata-rata (<i>mean</i>)</b>  | 7,487              | 89,8                  |
| <b>Median</b>                   | 7,453              | 89,4                  |
| <b>Standar deviasi</b>          | 0,556              | 6,7                   |
| <b>Persentil 5 (P5)</b>         | 6,633              | 79,6                  |
| <b>Persentil 95 (P95)</b>       | 8,446              | 101,3                 |
| <b>Minimum</b>                  | 5,515              | 66,2                  |
| <b>Maksimum</b>                 | 9,795              | 117,5                 |
| <b>Interval kepercayaan 90%</b> | <b>[6,6 – 8,4]</b> | <b>[79,6 – 101,3]</b> |

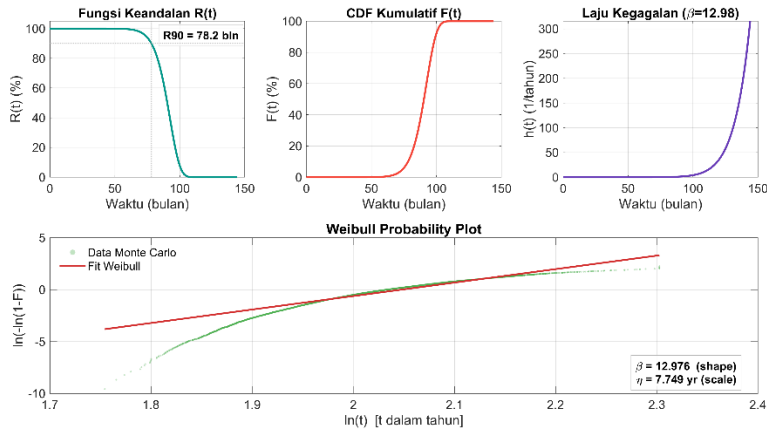
Tiga temuan penting dari distribusi ini:

1. **Selisih terhadap *baseline* deterministik.** Rata-rata TTF Monte Carlo (89,8 bulan) berada **10,3 bulan di bawah** TTF deterministik Layer 1 (100,1 bulan). Selisih ini secara eksklusif berasal dari faktor koreksi temperatur tropis ( $F_T = 1,1950$ ) yang diintegrasikan ke dalam fungsi sintesis, mengonfirmasi secara independen bahwa temperatur tropis memperpendek umur pakai anoda sekitar 10%.
2. **Bentuk distribusi.** Histogram menunjukkan distribusi yang mendekati **Normal** (*bell-shaped*) dengan sedikit *skewness* positif (ekor kanan lebih panjang). Bentuk unimodal dan simetris ini mengindikasikan bahwa model fisika yang mendasari bersifat stabil dan tidak menghasilkan perilaku bifurkasi atau anomali pada rentang parameter yang diuji.
3. **Sensitivitas parameter.** *Scatter plot* (Gambar 11.b) menunjukkan pola gradasi warna yang kontinu:
  - TTF terpendek (warna gelap) terkonsentrasi pada kuadran  **$i_c$  tinggi dan  $b$  tinggi**, kombinasi arus proteksi besar dan degradasi *coating* cepat menghasilkan konsumsi anoda tercepat.
  - TTF terpanjang (warna terang) berada pada kuadran  **$i_c$  rendah dan  $b$  rendah**.
  - Tidak terdapat efek ambang (*threshold*) yang tajam; kedua parameter berkontribusi secara kontinu terhadap TTF.

4.4.4 Analisis Keandalan Distribusi Weibull

Distribusi Weibull dipilih untuk memodelkan keandalan anoda karena fleksibilitasnya: melalui parameter bentuk ( $\beta$ ), distribusi ini dapat merepresentasikan berbagai mekanisme kegagalan, mulai dari kegagalan acak ( $\beta = 1$ ) hingga keausan progresif ( $\beta \gg 1$ ). Parameter Weibull diestimasi dari 10.000 sampel TTF menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE).

Kurva keandalan  $R(t)$ , fungsi distribusi kumulatif  $F(t)$ , laju kegagalan  $h(t)$ , dan *Weibull probability plot* disajikan pada Gambar 12.



**Gambar 12. Analisis Keandalan Weibull: (a) fungsi keandalan  $R(t)$  dan CDF  $F(t)$ , (b) fungsi laju kegagalan  $h(t)$ , dan (c) Weibull probability plot untuk verifikasi goodness-of-fit**

Nilai  $\beta$  yang sangat tinggi (jauh di atas 1) memiliki makna fundamental dalam konteks keandalan:

**Tabel 15. Interpretasi parameter  $\beta \approx 12,98$**

| Rentang $\beta$ | Pola Kegagalan                                        | Analogi                                        |
|-----------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| $\beta < 1$     | Laju kegagalan menurun<br>( <i>infant mortality</i> ) | Cacat manufaktur yang terseleksi seiring waktu |
| $\beta = 1$     | Laju kegagalan konstan<br>( <i>random failure</i> )   | Kegagalan acak tanpa pola usia                 |
| $\beta > 1$     | Laju kegagalan meningkat<br>( <i>wear-out</i> )       | Keausan mekanis progresif                      |
| $\beta \gg 3$   | Distribusi sangat sempit                              | Degradasi sistematis yang terprediksi          |

Nilai  $\beta \approx 12,98$  mengonfirmasi bahwa kegagalan anoda korban bukan bersifat acak, melainkan **degradasi sistematis** yang didominasi oleh keausan material secara progresif. Konsekuensinya, hampir seluruh populasi anoda akan gagal dalam rentang waktu yang relatif sempit, ini tercermin pada kurva  $R(t)$  di Gambar 12.a yang menunjukkan transisi tajam (*step-like*) dari keandalan  $\sim 100\%$  ke  $\sim 0\%$  dalam jendela waktu yang singkat.

Karakteristik ini memiliki implikasi positif bagi perencanaan pemeliharaan: **kegagalan anoda bersifat *predictable***, sehingga strategi penggantian terjadwal (*time-based replacement*) layak diterapkan, berbeda dengan komponen yang keagalannya bersifat acak ( $\beta \approx 1$ ) dimana hanya *condition-based monitoring* yang efektif.

#### Milestone keandalan:

Dari fungsi keandalan  $R(t)$ , waktu saat keandalan mencapai level kritis dapat dihitung:

**Tabel 16. Milestone Keandalan Anoda**

| Level Keandalan                 | Waktu (tahun) | Waktu (bulan) | Interpretasi                                        |
|---------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------------------------|
| <b><math>R(t) = 90\%</math></b> | $\sim 6,7$    | $\sim 80$     | <b>Batas inspeksi:</b> 10% populasi mulai gagal     |
| <b><math>R(t) = 80\%</math></b> | $\sim 7,0$    | $\sim 84$     | <b>Pertimbangan penggantian:</b> 20% populasi gagal |
| <b><math>R(t) = 50\%</math></b> | $\sim 7,5$    | $\sim 90$     | <b>Median kegagalan:</b> Setengah populasi gagal    |

Nilai  $t_{R90} \approx 80$  bulan menjadi parameter paling kritis: pada titik ini, 90% anoda masih berfungsi namun risiko kegagalan mulai meningkat secara signifikan akibat  $\beta$  yang tinggi. Inspeksi visual harus dilakukan **paling lambat pada bulan ke-80** untuk mengevaluasi kondisi aktual anoda dan menyiapkan penggantian jika diperlukan.

#### Verifikasi *goodness-of-fit*:

*Weibull probability plot* pada Gambar 12.c mengonfirmasi bahwa distribusi Weibull merupakan model yang sesuai: titik-titik data Monte Carlo mengikuti garis fit Weibull dengan baik, tanpa deviasi sistematis yang mengindikasikan pola kegagalan alternatif.

#### 4.4.5 Sintesis: Kontribusi Tiga Lapis Model

Ketiga lapis model secara kolektif membangun pemahaman yang semakin lengkap tentang umur pakai anoda. Kontribusi masing-masing lapis dirangkum pada Tabel berikut.

**Tabel 17. Perbandingan Kontribusi Tiga Lapis Model**

| Aspek             | Layer 1<br>(Deterministik) | Layer 2 (Dinamis)            | Layer 3 (Stokastik)        |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Asumsi lingkungan | Standar DNV (25°C)         | Data aktual harian           | Rata-rata + variasi        |
| Parameter         | Nominal tunggal            | Nominal + koreksi fisika     | Distribusi statistik       |
| Output            | TTF = 100,1 bulan          | $F_T = 1,2145$ ; $F_F = 1,0$ | TTF = $89,8 \pm 6,7$ bulan |
| Informasi baru    | <i>Benchmark</i> ideal     | Percepatan temperatur 21,5%  | Interval kepercayaan 90%   |
| Limitasi          | Tidak realistis            | Terbatas data 534 hari       | Bergantung asumsi CV       |

Progresi dari Layer 1 ke Layer 3 menunjukkan bahwa:

1. Koreksi temperatur tropis mereduksi TTF sebesar **10,3 bulan** (dari 100,1 ke 89,8 bulan), atau pengurangan **10,3%** dari *baseline*.
2. Variabilitas parameter menambahkan **interval ketidakpastian  $\pm 6,7$  bulan** di sekitar estimasi rata-rata.
3. Analisis Weibull mengonfirmasi bahwa kegagalan bersifat *wear-out* ( $\beta \approx 12,98$ ) dan batas inspeksi berada pada **bulan ke-80** untuk mempertahankan keandalan 90%.

Ketiga lapis ini secara bersama menghasilkan model prediktif yang terkuantifikasi secara probabilistik, bukan hanya menjawab *berapa lama* anoda bertahan, tetapi juga *seberapa yakin* prediksi tersebut.

#### 4.5 Analisis Historis: Konfrontasi Model dengan Realitas Lapangan

Model tiga lapis yang telah dibangun menghasilkan prediksi TTF dalam kondisi yang diasumsikan mendekati ideal, *coating* awal baik ( $FC_0 = 2$ ), parameter sesuai standar, dengan koreksi temperatur tropis. Namun, prediksi ini perlu divalidasi terhadap **data operasional nyata**: riwayat penggantian anoda yang telah tercatat di PLTGU Tanjung Uncang. Perbandingan antara prediksi model dan

kinerja lapangan mengungkapkan kesenjangan yang sangat signifikan dan menjadi titik kritis dalam analisis ini.

#### 4.5.1 Riwayat Penggantian Anoda PLTGU Tanjung Ugang

PLTGU Tanjung Ugang telah memasang dua *batch* anoda korban pada *water box* kondensor sebelum *batch* yang saat ini terpasang. Kronologi dan spesifikasinya dirangkum pada Tabel 14.

**Tabel 18. Riwayat Pemasangan dan Kegagalan Anoda Korban**

| Aspek                             | Batch 1                                                                             | Batch 2                                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Material</b>                   | Aluminum Alloy (bentuk disk)                                                        | Zinc 99% TMB B4 (bentuk balok)                              |
| <b>Massa awal</b>                 | 1,6 kg                                                                              | 3,6 kg                                                      |
| <b>Kapasitas elektrokimia (ε)</b> | 900 Ah/kg                                                                           | 780 Ah/kg                                                   |
| <b>Pemasangan</b>                 | Januari 2019                                                                        | Desember 2022                                               |
| <b>Kegagalan</b>                  | Desember 2022                                                                       | Februari 2025                                               |
| <b>Durasi operasi</b>             | <b>~47 bulan</b>                                                                    | <b>~26 bulan</b>                                            |
| <b>Mode kegagalan</b>             | Habis total, hanya baut tersisa; korosi agresif disertai kebocoran <i>water box</i> | Habis total saat inspeksi                                   |
| <b>Catatan</b>                    | Pemasangan pertama sistem proteksi katodik                                          | <i>Upgrade</i> material dan massa setelah kegagalan Batch 1 |

Dua fakta operasional dari tabel ini memerlukan perhatian khusus:

##### 1. **Batch 2 habis lebih cepat dari Batch 1**

Meskipun material ditingkatkan (dari Al ke Zn) dan massa ditambah 2,25× (dari 1,6 ke 3,6 kg). Dari perspektif desain proteksi katodik, ini merupakan anomali: peningkatan spesifikasi seharusnya memperpanjang umur pakai, bukan memperpendeknya.

##### 2. **Kegagalan Batch 1 mengakibatkan kebocoran**

Kegagalan Batch 1 mengakibatkan kebocoran yang mengindikasikan bahwa laju korosi melampaui kemampuan proteksi anoda, menyebabkan serangan korosi langsung pada baja *water box*.

#### 4.5.2 Reverse-Engineering Faktor Kerusakan Coating ( $FC_0$ )

Untuk mengidentifikasi akar penyebab habisnya anoda jauh lebih cepat dari prediksi, dilakukan perhitungan balik (*reverse-engineering*) untuk

mengestimasi faktor kerusakan *coating* efektif ( $FC^0$ ) yang konsisten dengan durasi operasional tercatat.

Logika dasarnya: jika anoda dengan massa efektif  $M_{eff}$  dan kapasitas  $\epsilon$  habis dalam  $\Delta t$  hari, maka arus rata-rata yang pasti mengalir selama periode tersebut dapat dihitung. Dari arus rata-rata ini, persamaan  $I_c = A_c \times i_c \times f_c$  dapat dibalik untuk menemukan  $FC_0$  efektif.

Berikut perhitungan lengkap untuk **Batch 2 (Zinc, 3,6 kg)**:

**Langkah 1: Durasi aktual:**

$$\Delta t = 1 \text{ Feb } 2025 - 1 \text{ Des } 2022 = 791 \text{ hari}$$

$$\Delta t \approx 26,0 \text{ bulan} \approx 2,165 \text{ tahun}$$

**Langkah 2: Massa efektif:**

$$M_{eff} = M_{awal} \times u$$

$$M_{eff} = 3,6 \times 0,85 = 3,060 \text{ k}$$

**Langkah 3: Total muatan listrik yang telah mengalir:**

$$Ah_{total} = M_{eff} \times$$

$$Ah_{total} = 3,060 \times 780 = 2.386,8 \text{ A}$$

Ini berarti selama 791 hari operasi, total 2.386,8 Ampere-jam muatan listrik telah mengalir melalui anoda untuk melindungi *water box*.

**Langkah 4: Arus rata-rata:**

**Total Jam Operasi:**

$$t_{jam} = 791 \text{ hari} \times 24 \text{ jam/hari} = 18.984 \text{ jam}$$

**Perhitungan Arus:**

$$I_{avg} = \frac{Ah_{total}}{t_{jam}}$$

$$I_{avg} = \frac{2.386,8}{18.984} = 0,1257 \text{ (125,7 mA)}$$

**Langkah 5:  $FC_0$  reverse-engineered:**

$$FC_{0,rev} = \frac{I_{avg}}{A_c \times i_{c,design}}$$

$$FC_{0,rev} = \frac{0,1257}{7,55 \times 0,070} = \frac{0,1257}{0,5285}$$

$$FC_{0,rev} = 0,2378429 \dots \approx \mathbf{0,238}$$

$FC_0 = 23,8$  berarti bahwa kondisi *coating water box* pada saat pemasangan Batch 2 **secara efektif setara dengan kerusakan 24%**, dibandingkan dengan asumsi ideal DNV ( $FC_0 = 2$ ). Perhitungan serupa untuk Batch 1 menghasilkan  $FC_0 = 6,7$ .

#### 4.5.3 Gap Analysis: Kuantifikasi Kesenjangan

Hasil perbandingan kuantitatif antara kinerja aktual dan prediksi ideal dirangkum pada tabel berikut.

**Tabel 19. Gap Analysis Kinerja Aktual vs Prediksi Ideal**

| Parameter                                   | Batch 1 (Al)      | Batch 2 (Zn)      |
|---------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| TTF aktual                                  | 47,0 bulan        | 26,1 bulan        |
| TTF ideal ( <i>baseline Layer 1</i> )       | 100,1 bulan       | 100,1 bulan       |
| Gap TTF                                     | <b>53,2 bulan</b> | <b>74,1 bulan</b> |
| Rasio TTF (Ideal / Aktual)                  | 2,1×              | 3,8×              |
| $FC_0$ aktual ( <i>reverse-engineered</i> ) | 6,7%              | 23,7%             |
| $FC_0$ ideal (standar DNV)                  | 2%                | 2%                |
| Rasio $FC_0$ (Aktual / Ideal)               | <b>3,4×</b>       | <b>11,9×</b>      |
| Tingkat keparahan                           | <b>BERAT</b>      | <b>KRITIS</b>     |

Tiga kesimpulan utama dari gap analysis:

1. **Kesenjangan bersifat masif dan memburuk:** Gap TTF meningkat dari 53,2 bulan (Batch 1) menjadi 74,1 bulan (Batch 2). Artinya, kondisi *water box* tidak membaik setelah penggantian, justru **semakin memburuk**.
2. **Peningkatan spesifikasi anoda tidak menyelesaikan masalah:** Meskipun massa anoda dinaikkan 2,25× dan material diganti ke zinc yang lebih standar, Batch 2 habis **21 bulan lebih cepat** dari Batch 1. Fakta ini mengonfirmasi temuan bahwa **integritas coating lebih kritis daripada spesifikasi anoda**. Menambah massa anoda tanpa memperbaiki kondisi *coating* sama dengan mengisi bahan bakar lebih banyak ke dalam tangki yang bocor.
3.  **$FC_0$  aktual berada pada tingkat anomali:**  $FC_0 = 23,7\%$  (Batch 2) berada **11,9× di atas** asumsi ideal. Bahkan untuk standar yang paling konservatif sekalipun, nilai  $FC_0$  sebesar ini mengindikasikan bahwa *coating water box* telah mengalami kerusakan struktural yang parah, bukan sekadar degradasi normal.

#### 4.5.4 Identifikasi Akar Penyebab

Tren  $FC_o$  yang meningkat dari 6,7% (Batch 1) ke 23,7% (Batch 2) mengindikasikan proses degradasi yang bersifat **kumulatif dan progresif**. Tiga faktor yang berkontribusi terhadap kondisi ini:

1. **Akumulasi kerusakan permukaan.** Kebocoran yang terjadi pada akhir masa pakai Batch 1 menunjukkan bahwa baja *water box* telah mengalami serangan korosi langsung. Permukaan yang sudah terkorosi memiliki luas efektif yang lebih besar dan membutuhkan arus proteksi yang jauh lebih tinggi bahkan setelah dilapisi ulang.
2. **Kualitas *coating* yang tidak memadai.** Penerapan *coating* pada permukaan yang telah terkorosi secara inheren kurang efektif dibandingkan pada permukaan yang masih *pristine*. Rongga dan *pittings* yang ada menjadi titik lemah dimana *coating* tidak dapat menempel sempurna, menghasilkan  $FC_o$  efektif yang jauh di atas nominal.
3. **Efek sinergis lingkungan tropis.** Temperatur tinggi yang persisten ( $\sim 30^\circ\text{C}$ ) tidak hanya mempercepat korosi anoda (sepaimana dkuantifikasi pada Sub-bab 5.3), tetapi juga mempercepat degradasi *coating* itu sendiri, sebuah efek *double jeopardy* yang tidak diperhitungkan dalam model standar.

Konsekuensi dari analisis ini adalah: **masalah utama bukan pada desain anoda, melainkan pada kondisi *coating* yang berperan sebagai variabel pengendali**, sebuah kesimpulan yang konsisten dengan hasil model deterministik (Sub-bab 4.2.2) yang mengidentifikasi *coating* sebagai parameter pengendali utama. Bedanya, pada model deterministik efek ini bersifat moderat ( $FC_o = 2\%$  ke  $10\%$  dalam 8 tahun); pada kenyataan lapangan,  $FC_o$  sudah berada di level  $24\%$  sejak awal pemasangan.

#### 4.6 Estimasi Sisa Umur Pakai Anoda Terpasang (Batch 3)

Anoda Batch 3, dengan spesifikasi identik dengan Batch 2 (Zinc TMB B4, 3,6 kg) dipasang pada Februari 2025. Per Maret 2026, anoda telah beroperasi selama  **$\sim 13$  bulan**. Estimasi sisa umur pakai (*Remaining Useful Life*, RUL) dilakukan melalui dua skenario yang merepresentasikan batas atas dan batas bawah prediksi.

##### 4.6.1 Skenario Ideal (Standar DNV, $FC_o = 2\%$ )

Skenario ini mengasumsikan *coating water box* dalam kondisi ideal sesuai standar DNV. Perhitungannya menggunakan interpolasi pada kurva degradasi massa Layer 1.

**Waktu operasi:**

$$t_{elapsed} = 1 \text{ Mar } 2026 - 1 \text{ Feb } 2025 = 393 \text{ hari}$$

$$t_{elapsed} \approx 12,9 \text{ bulan} \approx 1,076 \text{ tahun}$$

**Estimasi massa terkonsumsi:**

- **Faktor Pelapisan ( $f_c$ ):**

$$f_c(1,076) = 0,02 + (0,01 \times 1,076) = 0,03076$$

- **Arus Rata-rata ( $I_{c,avg}$ ):**

$$I_{c,avg} \approx \frac{I_c(0) + I_c(1,076)}{2} = \frac{10,57 + 16,25}{2} = 13,41 \text{ mA}$$

- **Massa Terkonsumsi:**

$$W_{now} \approx \frac{0,01341 \times (393 \times 24)}{780} = 0,162 \text{ k} \rightarrow 5,3$$

**Sisa umur:**

$$RUL_{ideal} = TTF_{ideal} - t_{elapsed} = 100,1 - 13 = 87,1 \text{ bln} (\approx 7,3 \text{ tahun})$$

#### 4.6.2 Skenario Aktual (Berdasarkan Historis Batch 2)

Batch 3 memiliki spesifikasi identik dengan Batch 2 (material, massa, geometri, lokasi pemasangan) dan beroperasi pada *water box* yang sama. Dengan tidak adanya informasi bahwa kondisi *coating* telah diperbaiki secara signifikan antara pemasangan Batch 2 dan Batch 3, pola konsumsi Batch 2 menjadi prediktor yang paling realistis.

**Laju konsumsi Batch 2:**

$$\text{Laju} = \frac{M_{eff}}{TTF_{Batch2}} = \frac{3,060}{26,0} = 0,1177 \text{ k/bln}$$

**Estimasi massa terkonsumsi Batch 3:**

$$W_{now} = 0,1177 \times 13 = 1,530 \text{ k} \rightarrow 50,0$$

**Sisa umur:**

$$RUL_{aktual} = TTF_{Batch2} - t_{elapsed} = 26,0 - 13,0 = 13,0 \text{ bln}$$

**Prediksi tanggal habis:**

$$t_{fail} = \text{Februari } 2025 + 26 \text{ bulan} \approx \text{April } 2027$$

#### 4.6.3 Perbandingan Dua Skenario

Tabel 20. Perbandingan Estimasi Status Anoda Batch 3 (per Maret 2026)

| Parameter              | Skenario Ideal  | Skenario Aktual | Rasio |
|------------------------|-----------------|-----------------|-------|
| Massa terkonsumsi      | ~0,16 kg (5,3%) | ~1,53 kg (50%)  | 9,4×  |
| Sisa umur estimasi     | ~87 bulan       | ~13 bulan       | 6,7×  |
| Prediksi tanggal habis | ~Mei 2033       | ~April 2027     | —     |
| Status                 | Sangat aman     | WASPADA         | —     |

Perbedaan **6,7×** antara kedua skenario mengungkapkan risiko operasional yang serius:

1. **Risiko *false sense of security***. Jika evaluasi hanya didasarkan pada kalkulasi ideal, manajemen akan menyimpulkan bahwa anoda masih sangat aman (baru 5,3% habis, sisa 7 tahun). Kesimpulan ini berpotensi **menunda inspeksi dan persiapan penggantian** secara signifikan.
2. **Urgensi operasional**. Berdasarkan skenario aktual, anoda Batch 3 sudah memasuki **paruh kedua masa pakainya**. Mengingat fenomena percepatan non-linear yang telah diidentifikasi pada Sub-bab 5.2.1, dimana 65% massa habis pada 40% akhir masa pakai, sisa 13 bulan ini merupakan periode dimana laju konsumsi justru semakin cepat.
3. **Jendela waktu untuk tindakan**. Dengan prediksi habis pada April 2027, persiapan penggantian (pengadaan anoda, penjadwalan *shutdown*, persiapan tenaga kerja) harus dimulai **paling lambat Januari 2027**, memberi waktu 3 bulan untuk logistik dan perencanaan.

#### 4.6.4 Validitas dan Keterbatasan Estimasi

Estimasi berbasis historis Batch 2 memiliki dua asumsi kritis:

1. **Asumsi kondisi *coating* serupa**. Jika *coating* telah diperbaiki secara menyeluruh sebelum pemasangan Batch 3,  $FC_o$  aktual bisa lebih rendah dari 23,7% dan sisa umur bisa lebih panjang. Namun, tanpa data inspeksi yang mengonfirmasi perbaikan, asumsi konservatif (kondisi serupa) lebih aman dari perspektif manajemen risiko.
2. **Asumsi laju konsumsi linear**. Perhitungan menggunakan laju rata-rata konstan, padahal degradasi bersifat non-linear (percepatan). Implikasinya: jika anoda sudah benar-benar di paruh kedua, sisa umur aktual bisa **lebih pendek** dari 13 bulan, bukan lebih panjang.

Kedua asumsi ini bekerja dalam arah yang berlawanan: asumsi pertama mungkin terlalu pesimistis, sementara asumsi kedua mungkin terlalu optimistis.

Secara agregat, estimasi 13 bulan merupakan pendekatan yang cukup realistis sebagai *baseline* perencanaan operasional.

## 4.7 Analisis Biaya Siklus Hidup dan Rekomendasi Strategi Pemeliharaan

Analisis pada sub-bab sebelumnya telah mengidentifikasi dua realitas yang saling melengkapi: pertama, model prediktif menghasilkan estimasi TTF yang terkuantifikasi secara probabilistik (Sub-bab 4.4); kedua, kondisi lapangan menunjukkan bahwa anoda habis 2–4× lebih cepat dari ideal akibat kondisi *coating* yang buruk (Sub-bab 4.5). Estimasi sisa umur Batch 3 hanya ~13 bulan (Sub-bab 4.6) mempertegas urgensi situasi. Pertanyaan yang tersisa, dan menjadi fokus sub-bab ini, adalah: **strategi pemeliharaan mana yang paling efisien secara biaya?**

Untuk menjawab pertanyaan tersebut, dilakukan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) yang membandingkan dua skenario pemeliharaan menggunakan metode *Net Present Value* (NPV) selama horizon analisis 10 tahun.

### 4.7.1 Parameter dan Asumsi Biaya

Seluruh parameter biaya yang digunakan dalam analisis ini bersifat **asumsi**, karena pihak pembangkit menyatakan bahwa data biaya operasional bersifat sensitif dan tidak dapat dibagikan. Asumsi disusun berdasarkan data pembanding dari sumber yang kredibel (harga pasar, tarif PLN, estimasi industri).

**Tabel 21. Komponen Biaya untuk Analisis LCCA**

| Komponen Biaya                         | Nilai (Rp)           | Keterangan                            |
|----------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Harga anoda per kg                     | 150.000              | Harga pasar zinc anode grade industri |
| Massa per anoda                        | 3,6 kg               | Spesifikasi TMB B4                    |
| Jumlah anoda                           | 15 unit              | Konfigurasi <i>water box</i>          |
| Biaya material                         | <b>8.100.000</b>     | $150.000 \times 3,6 \times 15$        |
| Biaya jasa pemasangan                  | 15.000.000           | Termasuk <i>confined space entry</i>  |
| C_replace (total penggantian)          | <b>23.100.000</b>    | Material + jasa                       |
| Crepair (perbaikan <i>_water box</i> ) | 75.000.000           | Pengelasan, pengujian, sertifikasi    |
| Kapasitas STG                          | 40.000 kW            | 40 MW                                 |
| Durasi downtime                        | 72 jam               | Estimasi perbaikan + <i>start-up</i>  |
| Tarif listrik                          | 1.114,74 /kWh        | Tarif dasar PLN industri              |
| C_downtime                             | <b>3.210.451.200</b> | $40.000 \times 72 \times 1.114,74$    |

Biaya *downtime* dihitung berdasarkan potensi hilangnya pendapatan produksi listrik selama masa gangguan paksa:

**Perhitungan Biaya *Downtime* ( $C_{downtime}$ ):**

$$C_{downtime} = \text{Kapasitas} \times \text{Durasi} \times \text{Tarif}$$

$$C_{downtime} = 40.000 \text{ kW} \times 72 \text{ jam} \times \text{Rp } 1.114,74/\text{kWh}$$

$$C_{downtime} = \text{Rp } 3.210.451.200$$

**Total Biaya per Kejadian Kegagalan ( $C_{failure}$ ):**

Estimasi ini mencakup biaya penggantian material, perbaikan kerusakan fisik, dan kerugian operasional (*run-to-failure*).

$$C_{failure} = C_{replace} + C_{repair} + C_{downtime}$$

Menggunakan satuan jutaan Rupiah:

- $C_{replace}$  (Material): **Rp 23,1 Juta**
- $C_{repair}$  (Perbaikan): **Rp 75,0 Juta**
- $C_{downtime}$  (Operasional): **Rp 3.210,5 Juta**

$$C_{failure} = 23,1 + 75,0 + 3.210,5 = \text{Rp } 3.308,6 \text{ Jt}$$

Parameter finansial: suku bunga diskonto  $r = 8\%$  per tahun; horizon analisis = 10 tahun.

#### 4.7.2 Analisis LCCA: Preventive vs Run-to-Failure

Dua skenario pemeliharaan dibandingkan:

1. **Skenario 1 Preventive Maintenance:** Anoda diganti secara terjadwal **sebelum** habis total, pada interval  $90\% \times \text{TTF}_{\text{faktual}}$ . Karena penggantian dilakukan saat anoda masih operasional, tidak terjadi kebocoran, sehingga biaya per kejadian hanya  $C_{replace} = \text{Rp } 23,1 \text{ juta}$  (tanpa biaya perbaikan dan *\_downtime*).

$$\text{Interval} = 90 = \mathbf{1,9491 \text{ tahun}}$$

Kejadian dalam 10 tahun:  $t = 1,949; 3,898; 5,847; 7,796; 9,745 \rightarrow \mathbf{5 \text{ kejadian}}$

2. **Skenario 2 Run-to-Failure (RTF):** Anoda dibiarkan beroperasi hingga habis total, menyebabkan kebocoran *water box*. Biaya per kejadian

$$= C_{failure} = \text{Rp } 3.308,6 \text{ juta (penggantian + perbaikan + downtime)}.$$

$$\text{Interval} = TTF_{aktual} = 2,1656 \text{ tahun}$$

Kejadian dalam 10 tahun:  $t = 2,166; 4,331; 6,497; 8,663 \rightarrow 4 \text{ kejadian}$

#### Perhitungan NPV Skenario Preventive:

**Tabel 22. Perhitungan NPV: Skenario Preventive (C = Rp 23,1 juta per kejadian)**

| Kejadian         | Waktu (tahun) | Faktor Diskonto $1/(1,08)^t$ | PV (Rp juta) |
|------------------|---------------|------------------------------|--------------|
| 1                | 1,949         | 0,8607                       | 19,88        |
| 2                | 3,898         | 0,7408                       | 17,11        |
| 3                | 5,847         | 0,6376                       | 14,73        |
| 4                | 7,796         | 0,5488                       | 12,68        |
| 5                | 9,745         | 0,4724                       | 10,91        |
| <b>Total NPV</b> |               |                              | <b>75,3</b>  |

#### Perhitungan NPV Skenario Run-to-Failure:

**Tabel 23. Perhitungan NPV: Skenario RTF (C = Rp 3.308,6 juta per kejadian)**

| Kejadian         | Waktu (tahun) | Faktor Diskonto $1/(1,08)^t$ | PV (Rp juta)   |
|------------------|---------------|------------------------------|----------------|
| 1                | 2,166         | 0,8465                       | 2.800,6        |
| 2                | 4,331         | 0,7165                       | 2.370,7        |
| 3                | 6,497         | 0,6065                       | 2.006,7        |
| 4                | 8,663         | 0,5134                       | 1.698,6        |
| <b>Total NPV</b> |               |                              | <b>8.876,6</b> |

#### Perbandingan Final:

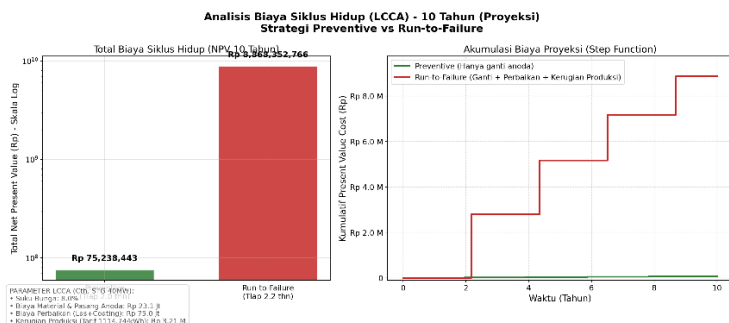
**Tabel 24. Perbandingan LCCA: Preventive vs Run-to-Failure (Horizon 10 Tahun)**

| Metrik                 | Preventive          | Run-to-Failure         |
|------------------------|---------------------|------------------------|
| Jumlah kejadian        | 5                   | 4                      |
| Biaya per kejadian     | Rp 23,1 juta        | Rp 3.308,6 juta        |
| NPV Total              | <b>Rp 75,3 juta</b> | <b>Rp 8.876,6 juta</b> |
| Rasio NPV              | 1×                  | 118×                   |
| Penghematan Preventive | —                   | <b>99,2%</b>           |

$$\text{Penghematan} = \frac{8.876,6 - 75,3}{8.876,6} \times 100\%$$

$$\text{Penghematan} = \frac{8.801,3}{8.876,6} \times 100\% = 99,2\%$$

Perbandingan NPV dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 13. Perbandingan NPV: skenario Preventive Maintenance vs Run-to-Failure selama horizon 10 tahun**

### 4.7.3. Interpretasi: Anatomi Biaya Kegagalan

Tiga temuan kritis dari analisis LCCA:

1. Strategi preventive memiliki **lebih banyak kejadian** (5 vs 4) namun NPV-nya **118× lebih rendah**. Kenaikan frekuensi penggantian menjadi tidak relevan ketika setiap kejadian preventive hanya membebankan 0,7% dari biaya satu kegagalan.
2. Anatomi biaya per kejadian RTF menunjukkan bahwa 97% biaya berasal dari *downtime*:

**Tabel 25. Anatomi Biaya Komponen Skenario Run-to-Failure (RTF) per Kejadian Kegagalan**

| Komponen                                    | Biaya (Rp juta) | Proporsi     |
|---------------------------------------------|-----------------|--------------|
| <b>Material + jasa pemasangan</b>           | 23,1            | 0,7%         |
| <b>Perbaikan <i>water box</i></b>           | 75,0            | 2,3%         |
| <b><i>Downtime</i> (hilangnya produksi)</b> | <b>3.210,5</b>  | <b>97,0%</b> |
| <b>Total per kegagalan</b>                  | <b>3.308,6</b>  | <b>100%</b>  |

3. Biaya sesungguhnya dari kegagalan anoda **bukan pada komponen yang rusak**, anoda seharga Rp 8,1 juta nyaris tidak signifikan. Yang mahal adalah **hilangnya produksi listrik**: pembangkit 40 MW yang berhenti selama 72 jam kehilangan pendapatan senilai **Rp 3,2 miliar per kejadian**.
4. Dalam horizon 10 tahun, strategi preventive menghindarkan potensi kerugian sebesar Rp 8.878 juta (~Rp 8,9 miliar). Angka ini setara dengan **>1.000 unit anoda baru**, sebuah perspektif yang menekankan bahwa

investasi dalam penggantian terjadwal bersifat sangat kecil dibandingkan risiko kegagalan.

#### 4.7.4. Rekomendasi Strategi Pemeliharaan Prediktif

Berdasarkan seluruh temuan yang telah dipaparkan pada Sub-bab 5.1 hingga 5.7, rekomendasi strategi pemeliharaan dirumuskan dalam tiga tingkatan urgensi:

**Tabel 26. Rekomendasi Strategi Pemeliharaan Anoda Korban**

| Tingkat               | Rekomendasi                                                                             | Dasar Analisis                                          | Tenggat                         |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Segera</b>         | Lakukan inspeksi visual kondisi anoda Batch 3                                           | RUL estimasi = 13 bulan (Sub-bab 5.6)                   | Sebelum April 2027              |
| <b>Segera</b>         | Siapkan anoda pengganti (pengadaan + logistik)                                          | Jendela waktu tindak 3 bulan                            | Januari 2027                    |
| <b>Menengah</b>       | Adopsi interval penggantian preventive = 1,95 tahun ( $90\% \times \text{TTF aktual}$ ) | LCCA: penghematan 99,2% (Sub-bab 5.7)                   | Berlaku sejak Batch 4           |
| <b>Menengah</b>       | Integrasikan inspeksi pada bulan ke-80 ( $t_R 90$ ) untuk skenario ideal                | Analisis Weibull: $\beta \approx 12,98$ (Sub-bab 5.4)   | Kebijakan jangka menengah       |
| <b>Jangka panjang</b> | Tingkatkan kualitas <i>coating water box</i>                                            | $FC_o$ aktual $12-24\times$ di atas ideal (Sub-bab 5.5) | Saat <i>overhaul</i> berikutnya |
| <b>Jangka panjang</b> | Pertimbangkan peningkatan massa anoda                                                   | Memperpanjang siklus proteksi, mengurangi frekuensi     | Evaluasi teknis                 |

Dua rekomendasi yang paling kritis:

1. **Perbaikan *coating* adalah prioritas utama:** Seluruh temuan, dari model deterministik yang mengidentifikasi *coating* sebagai parameter pengendali (Sub-bab 3.2.2), hingga gap analysis yang mengungkapkan  $FC_o 12\times$  di atas ideal (Sub-bab 3.5.3), secara konsisten menunjuk pada satu akar masalah yang sama. Menambah massa anoda atau mengganti material tanpa memperbaiki *coating* bersifat **paliatif**: mungkin memperpanjang siklus, tetapi tidak mengatasi penyebab fundamental.
2. **Adopsi strategi preventive bersifat *non-negotiable*:** Dengan rasio biaya 118:1 antara RTF dan preventive, secara ekonomis tidak ada justifikasi untuk mempertahankan pendekatan *run-to-failure*. Biaya satu kegagalan

(Rp 3,3 miliar) setara dengan biaya **143 kali penggantian preventive**, sebuah perbandingan yang tidak memerlukan analisis sensitivitas untuk mengambil keputusan.

## BAB 5 Penutup

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab sebelumnya, kesimpulan penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. **Pengembangan Model Simulasi Kuantitatif Laju Konsumsi Anoda:** Model simulasi multi-lapis berhasil dikembangkan dengan mengintegrasikan tiga tingkat kompleksitas: (a) Layer 1: model deterministik berbasis DNV-RP-B401 yang menghasilkan TTF ideal sebesar 100,1 bulan; (b) Layer 2: model dinamis dengan koreksi Arrhenius dan *Power-Law* berbasis 534 titik data monitoring harian, yang mengidentifikasi temperatur tropis sebagai faktor percepatan korosi paling dominan ( $F_T \approx 1,2145$ ; percepatan +21,5%); serta (c) Layer 3: simulasi Monte Carlo ( $N = 10.000$ ) yang menghasilkan distribusi TTF dengan rata-rata 89,8 bulan dan interval kepercayaan 90% sebesar [79,6 – 101,3 bulan]. Integrasi ketiga *layer* menghasilkan model yang mampu memberikan estimasi titik sekaligus mengkuantifikasi ketidakpastian prediksi secara probabilistik.
2. **Prediksi Sisa Umur Pakai (RUL) Anoda Korban:** RUL berhasil diprediksi melalui dua pendekatan. Secara probabilistik, distribusi Weibull ( $\beta \approx 12,98, \eta \approx 7,7 \text{ tahun}$ ) mengonfirmasi mekanisme wear-out dan menetapkan milestone inspeksi pada  $t_{R90} \approx 80$  bulan. Secara historis, konfrontasi model dengan data lapangan mengungkapkan bahwa anoda aktual habis 2,8–3,9× lebih cepat dari ideal akibat *coating breakdown factor* ( $FC_0$ ) yang 12–24× di atas nilai standar. Untuk Batch 3 yang terpasang sejak Februari 2025, sisa umur estimasi hanya ~13 bulan dengan prediksi habis sekitar April 2027. Temuan ini menegaskan bahwa **kondisi *coating water box* merupakan akar masalah utama**, bukan spesifikasi material atau massa anoda.
3. **Transformasi Hasil Analisis menjadi Strategi Pemeliharaan Prediktif:** Analisis LCCA selama horizon 10 tahun menunjukkan bahwa strategi preventive (interval 1,95 tahun, NPV = Rp 75,3 juta) menghemat **99,2%** dibandingkan *run-to-failure* (NPV = Rp 8.876,6 juta). Dominasi biaya *downtime* (97% dari total biaya per kegagalan) menjadikan setiap kejadian kegagalan berbiaya Rp 3,3 miliar, setara dengan 143 kali biaya penggantian preventive. Rasio biaya 118:1 ini memberikan justifikasi ekonomis yang sangat kuat untuk mengadopsi strategi pemeliharaan preventive.

## 5.2 Saran

### 5.2.1. Saran bagi Perusahaan

1. Lakukan inspeksi visual anoda Batch 3 sebelum April 2027 dan siapkan anoda pengganti minimal 3 bulan sebelum tenggat prediksi.
2. Adopsi strategi pemeliharaan preventive dengan interval penggantian  $\sim 1,95$  tahun ( $90\% \times \text{TTF aktual}$ ).
3. Prioritaskan perbaikan kualitas *coating water box* pada saat *overhaul* berikutnya, karena seluruh analisis menunjukkan coating sebagai akar masalah utama percepatan konsumsi anoda.

### 5.2.2. Saran bagi Akademisi

1. Kembangkan basis data empiris *coating breakdown factor* ( $FC_0$ ) untuk kondisi lingkungan tropis Indonesia, mengingat nilai aktual yang ditemukan jauh melebihi asumsi standar internasional.
2. Eksplorasi penerapan kerangka kerja multi-lapis (deterministik  $\rightarrow$  dinamis  $\rightarrow$  stokastik) untuk analisis degradasi komponen pembangkit lainnya yang mengalami mekanisme keausan progresif.

### 5.2.3. Saran bagi Peneliti Selanjutnya

1. Validasi model dengan data inspeksi langsung (pengukuran massa tersisa dan potensial proteksi) untuk meningkatkan akurasi kalibrasi parameter.
2. Integrasikan sistem pemantauan *real-time* dengan model prediktif untuk memungkinkan estimasi RUL yang diperbarui secara adaptif.
3. Kaji pengaruh variasi salinitas, pH, dan *biofouling* yang belum tercakup dalam model saat ini.
4. Lakukan analisis sensitivitas LCCA dengan data biaya aktual dari pihak pembangkit untuk optimasi interval penggantian yang lebih presisi.

## Daftar Pustaka

- [1] Z. Lan, X. Wang, B. Hou, Z. Wang, J. Song, and S. Chen, "Simulation of sacrificial anode protection for steel platform using boundary element method," *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 36, no. 5, pp. 903–906, May 2022, doi: 10.1016/j.enganabound.2011.07.018.
- [2] J. -F. Yan, S. N. R. Pakalapati, T. V. Nguyen, R. E. White, and R. B. Griffin, "Mathematical Modeling of Cathodic Protection Using the Boundary Element Method with a Nonlinear Polarization Curve," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 139, no. 7, pp. 1932–1936, Jul. 1992, doi: 10.1149/1.2069524.
- [3] S. M. A. Bukhari *et al.*, "Modelling and simulation of cathodic protection using magnesium sacrificial anode for steel Bent-Y-Pipe in seawater environment," 2025, Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: [https://so01.tci-thaijo.org/index.php/APST/article/view/273754?utm\\_source=chatgpt.com](https://so01.tci-thaijo.org/index.php/APST/article/view/273754?utm_source=chatgpt.com)
- [4] E. Ramasso and A. Saxena, "Review and Analysis of Algorithmic Approaches Developed for Prognostics on CMAPSS ," 2014, Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150007677/downloads/20150007677.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150007677/downloads/20150007677.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [5] B. Farkas and G. R. Bea, *PIPELINE INSPECTION MAINTENANCE & PERFORMANCE INFORMATION SYSTEM*. 1998. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program//254ac.pdf>
- [6] A. Motrani, M. Z. Bousbaa, R. N. Saadat, and R. Nouredine, "Predictive Maintenance: A Machine Learning Approach to Remaining Useful Life (RUL) Estimation of Industrial Machines," 2024.
- [7] A. D. Wibowo and A. Ghofur, "PENGARUH KADAR SALINITAS AIR TERHADAP LAJU KOROSI BAJA ST 60," *JTAM ROTARY*, vol. 7, no. 1.
- [8] Y. Mariah, "STUDI KOROSI PLAT BAJA MATERIAL KAPAL TERHADAP SALINITAS DAN DERAJAT KEASAMAN (PH) DI PELABUHAN PENGASINAN PERTAMINA JAKARTA ," *Jurnal Indonesia Sosial Sains* , vol. 2, no. 3, pp. 2723–6595, Mar. 2021, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/464960-none-a713fa5a.pdf>

- [9] J. K. Pattireuw, A. F. Rauf, and R. Lumintang, "ANALISIS LAJU KOROSI PADA BAJA KARBON DENGAN MENGGUNAKAN AIR LAUT DAN H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>," 2013, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/poros/article/download/2393/1927/4338>
- [10] 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.
- [11] N. Hassan, "Corrosion Study in Crude Oil Pipelines," 2019, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/openview/7fab81a2fcc5b5e9d8db1166a88d0976/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- [12] T. Ihza Mahendra and D. Dwisetiono, "Proteksi Katodik Menggunakan Zinc Anode Untuk Menghambat Korosi Pada Lambung Kapal Port Link VII Jakarta," *Zona Laut : Jurnal Inovasi Sains Dan Teknologi Kelautan*, pp. 7–12, Jul. 2022, doi: 10.20956/zl.vi.19694.
- [13] F. A. Hudi and Rildova, "ANALISIS DESAIN SACRIFICIAL ANODE CATHODIC PROTECTION PADA JARINGAN PIPA BAWAH LAUT," 2022, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: [https://multisite.itb.ac.id/fts/wp-content/uploads/sites/8/2012/11/15506038-Fajar\\_Alam\\_Hudi.pdf](https://multisite.itb.ac.id/fts/wp-content/uploads/sites/8/2012/11/15506038-Fajar_Alam_Hudi.pdf)
- [14] E. Nicholson, "Two Halves of a Whole: Coatings and Cathodic Protection," 2012, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.cathodicprotectiondvcginstruments.com/two-halves-of-a-whole-coatings-and-cathodic-protection/>
- [15] B. Syahputra, S. J. Sisworo, and A. Trimulyono, "Analisa Teknis & Ekonomis Perancangan Sistem Pencegahan Korosi Pada Lambung Kapal, Dengan Variasi Sistem Pencegahan Menggunakan ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) Dibandingkan dengan SACP (Sacrificial Anode Cathodic Protection)," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 3, no. 2, pp. 247–253, 2015, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=1417654&val=4688&title=Analisa+Teknis++Ekonomis+Perancangan+Sistem+Pencegahan+Korosi+Pada+Lambung+Kapal+Dengan+Variasi+Sistem+Pencegahan+Menggunakan+ICCP+Impressed+Current+Cathodic+Protection+Dibandingkan+dengan+SACP+Sacrificial+Anode+Cathodic+Protection>

- [16] C. Le, *Chapter 6 Cathodic Protection*, vol. 6. 2024. Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.seattle.gov/documents/departments/spu/engineering/dsg/2024/6cathodicprotectionfinalredacted.pdf>
- [17] A. Meillier, "A review of galvanic anode cathodic protection design procedure," vol. 4, no. 13, 2023, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.jcse.org/viewPaper/ID/199/K1fMXMbgs6GOlxKGI4U5BhYzvSeYZc>
- [18] United States Naval Academy (USNA), "Cathodic Protection Design," 2009, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: [https://www.usna.edu/NAOE/\\_files/documents/Courses/EN380/Course\\_Notes/Cathodic%20Protection%20Design.pdf](https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN380/Course_Notes/Cathodic%20Protection%20Design.pdf)
- [19] C. Erdogan and G. Swain, "Conceptual Sacrificial Anode Cathodic Protection Design for offshore wind monopiles," *Ocean Engineering*, vol. 235, p. 109339, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109339.
- [20] L. Li, Q. Wang, Y. Chen, X. Chen, and Q. Shi, "The Faraday efficiency of nitrate reduction reactions and selectivity of final product for electrocatalysts Cu/Co-OH/CF by tuning the content of Co source," *Front. Chem.*, vol. 13, Jul. 2025, doi: 10.3389/fchem.2025.1599613.
- [21] R. G. Ehl and A. J. Ihde, "Faraday's electrochemical laws and the determination of equivalent weights," *J. Chem. Educ.*, vol. 31, no. 5, p. 226, May 1954, doi: 10.1021/ed031p226.
- [22] Y. Bai and Q. Bai, "Corrosion Prevention," in *Subsea Pipelines and Risers*, Elsevier, 2005, pp. 229–240. doi: 10.1016/B978-008044566-3.50017-8.
- [23] Y. Bai and Q. Bai, "Subsea Corrosion and Scale," in *Subsea Engineering Handbook*, Elsevier, 2019, pp. 455–487. doi: 10.1016/B978-0-12-812622-6.00017-8.
- [24] A. J. . Bard, L. R. . Faulkner, and H. S. . White, *Electrochemical methods : fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Ltd., 2022.
- [25] R. Felix-Contreras *et al.*, "Kinetic and Thermodynamic Aspects of the Degradation of Ferritic Steels Immersed in Solar Salt," *Materials*, vol. 17, no. 23, p. 5776, Nov. 2024, doi: 10.3390/ma17235776.
- [26] A. A. Khadom, A. S. Yaro, A. A. H. Kadum, A. S. AlTaie, and A. Y. Musa, "The Effect of Temperature and Acid Concentration on Corrosion of Low Carbon Steel in Hydrochloric Acid Media," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 7, pp. 1403–1409, Jul. 2009, doi: 10.3844/ajassp.2009.1403.1409.

- [27] A. A. Khadom, A. S. Yaro, A. S. AlTaie, and A. A. H. Kadum, "Electrochemical, Activations and Adsorption Studies for the Corrosion Inhibition of Low Carbon Steel in Acidic Media," *Portugaliae Electrochimica Acta*, vol. 27, no. 6, pp. 699–712, 2009, doi: 10.4152/pea.200906699.
- [28] A. Soares, L. C. Gomes, G. A. Monteiro, and F. J. Mergulhão, "Hydrodynamic Effects on Biofilm Development and Recombinant Protein Expression," *Microorganisms*, vol. 10, no. 5, p. 931, Apr. 2022, doi: 10.3390/microorganisms10050931.
- [29] Bahariawan Danutirto Wicaksono and Lisa Puspita Ariyanto, "Analisa Laju Korosi Pada Baja ST 40 Dengan Medium Air Laut Di Pelabuhan Gresik Menggunakan Magnetic Stirrer," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro dan Komputer*, vol. 5, no. 2, pp. 43–50, Jun. 2025, doi: 10.51903/juritek.v5i2.4293.
- [30] W. H. Ahmed, M. M. Bello, M. El Nakla, and A. Al Sarkhi, "Flow and mass transfer downstream of an orifice under flow accelerated corrosion conditions," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 252, pp. 52–67, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.033.
- [31] H. Abdullahi, A. Rufai, and S. S. Yabo, "Power-Law Fluid Flow and Heat Transfer via Vertical, Parallel Porous Walls with Varying Thermal Conductivity and Viscosity, As Well As Nth Order Chemical Reaction," *Saudi Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, no. 11, pp. 570–584, Dec. 2022, doi: 10.36348/sjet.2022.v07i11.003.
- [32] A. M. S. Bukhari *et al.*, "Modelling and simulation of cathodic protection using magnesium sacrificial anode for steel Bent-Y-Pipe in seawater environment," *Journal of Science and Technology*, vol. 30, no. 1x, 2025, doi: <https://doi.org/10.14456/apst.2025.10>.
- [33] A. Valor, F. Caleyó, L. Alfonso, J. C. Velázquez, and J. M. Hallen, "Markov Chain Models for the Stochastic Modeling of Pitting Corrosion," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1155/2013/108386.
- [34] N. P. Essang, "Simulation and Modelling of Pipeline Corrosion and Integrity Management in Oil and Gas Industry," *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, vol. Volume-3, no. Issue-2, pp. 458–461, Feb. 2019, doi: 10.31142/ijtsrd21411.
- [35] Z. Lin, X. Liu, Y. Xiang, and Y. Hong, "Modeling Multivariate Degradation Data with Dynamic Covariates Under a Bayesian Framework," Apr. 2025, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: [https://arxiv.org/abs/2504.05484?utm\\_source=chatgpt.com](https://arxiv.org/abs/2504.05484?utm_source=chatgpt.com)

- [36] C.-W. Yang, F.-Y. Hung, T.-S. Lui, L.-H. Chen, and J.-Y. Juo, "Weibull Statistics for Evaluating Failure Behaviors and Joining Reliability of Friction Stir Spot Welded 5052 Aluminum Alloy," *Mater. Trans.*, vol. 50, no. 1, pp. 145–151, 2009, doi: 10.2320/matertrans.MRA2008341.
- [37] E. Al-Mahdawi, M. Abusin, and B. Bhattarai, "Weibull Analysis of Sabroe Chiller Reliability at Heathrow Airport: Implications for Infrastructure Management," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 70–81, Apr. 2025, doi: 10.14445/23488360/IJME-V12I4P107.
- [38] W. B. . Nelson, *Applied Life Data Analysis*. John Wiley & Sons, 2005.
- [39] F. Wu, Q. Wu, Y. Tan, and X. Xu, "Remaining Useful Life Prediction Based on Deep Learning: A Survey.," *Sensors (Basel)*, vol. 24, no. 11, May 2024, doi: 10.3390/s24113454.
- [40] Y. Pan, S. Kang, L. Kong, J. Wu, Y. Yang, and H. Zuo, "Remaining useful life prediction methods of equipment components based on deep learning for sustainable manufacturing: a literature review," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 39, p. e4, Feb. 2025, doi: 10.1017/S0890060424000271.
- [41] S. Sayyad, S. Kumar, A. Bongale, A. M. Bongale, and S. Patil, "Estimating Remaining Useful Life in Machines Using Artificial Intelligence: A Scoping Review," pp. 1–26, 2021, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/4798/>
- [42] K. Ozbay, N. A. Parker, D. Jawad, and S. Hussain, "Guidelines for Life Cycle Cost Analysis," 2003. Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://cait.rutgers.edu/wp-content/uploads/2018/05/fhwa-nj-2003-012.pdf>
- [43] A. A.S, C. Chua, S. J. L. S.J.L, M. Riley, and Gan. S.W, "The Impact of Life Cycle Cost Analysis (LCC) Towards Maintenance Performance for High-Rise Residential Lift System," *Journal of Design and Built Environment*, vol. 22, no. 1, pp. 1–12, Apr. 2022, doi: 10.22452/jdbe.vol22no1.1.

## Biodata



Nama : Nurul Hasanah  
TTL : Batam, 10 Maret 2003  
Agama : Islam  
Alamat : BKG KOLAM, JL AKASIA BLK 12C NO. 01  
Email : nurulhasanah20030310@gmail.com  
Riwayat : SMA: SMA NEGERI 8 BATAM  
Pendidikan : SMP: SMP NEGERI 30 BATAM

# Lampiran

## Lampiran 1. Source Code Program Utama Simulasi (main\_simulation.m)

```
% main_simulation.m
% Skrip Utama Orchestrator Simulasi Konsumsi Anoda Korban
% Dua Studi Kasus + LCCA

clc; clear; close all;

fprintf('=====\\n');
fprintf('  SIMULASI WATER BOX KONDENSOR PLTGU TANJUNG UNCANG \\n');
fprintf('  Oleh: Nurul Hasanah (4232211004) - TRPE Polibatam 2026 \\n');
fprintf('=====\\n\\n');

%% Modul 0: Persiapan Data & Arsitektur
% Memuat konfigurasi parameter
cfg = config();

% Memuat dan pra-pemrosesan data monitoring
data = data_preprocessing();

fprintf('Pre-processing data selesai.\\n\\n');

%% Modul 1: Layer 1 (SK2 Ideal - Deterministic)
r1 = layer1_deterministic(cfg);

%% Modul 2: Layer 2 (SK2 Dinamis - Temperature & Flow rate)
r2 = layer2_dynamic(cfg, data.valid, data.refs);

%% Modul 3: Layer 3 (Monte Carlo & Weibull)
[mc, wb] = layer3_montecarlo(cfg, data.refs);

%% Modul 4: Studi Kasus 1 (Historical Analysis) & Sisa Umur Saat Ini
[hist, gaps, current_status] = historical_analysis(cfg, r1, wb.stats);

%% Modul 5: Analisa Biaya Daur Hidup (LCCA)
% Menggunakan TTF Aktual Batch 2 (karena spesifikasi massa 3.6kg identik Batch 3)
lcca = lcca_analysis(hist(2).duration_years);

%% Modul 6: Visualisasi Ekstensif
fprintf('Mengekspor Output Grafik Akademis ...\\n');
visualisation(data, r1, r2, hist, gaps, current_status, mc, wb, lcca);
fprintf('--- SIMULASI SELESAI ---\\n');
```

## Lampiran 2. Source Code Konfigurasi Parameter Model (config.m)

```
function cfg = config()
% config.m
%% =====
% KONSTANTA FISIKA
% =====
cfg.R_UNIVERSAL = 8.314;          % Konstanta gas universal (J/mol.K)
cfg.FARADAY     = 96485;         % Konstanta Faraday (C/mol)
```

```

%% =====
% PARAMETER STANDAR DNV-RP-B401
% =====
cfg.U_UTIL      = 0.85;      % Faktor utilisasi anoda (-)
cfg.IC_DESIGN   = 0.070;    % Densitas arus proteksi rata-rata A/m^2 (tropis,
>20°C)

%% =====
% PARAMETER WATER BOX KONDENSOR (Data Teknis PLTGU)
% =====
cfg.AC          = 7.55; % Luas permukaan total water box yang dilindungi (m^2)

%% =====
% MODEL ARRHENIUS - Koreksi Temperatur (Pers. 2.6)
% =====
cfg.EA_ZN       = 27.43e3;   % Energi aktivasi korosi seng (J/mol)
cfg.T_REF       = 298.15;    % Temperatur referensi (K) = 25°C

%% =====
% MODEL POWER-LAW - Koreksi Aliran (Pers. 2.7)
% =====
cfg.M_FLOW      = 1.0;      % Eksponen power-law aliran (-)

%% =====
% SIMULASI MONTE CARLO (Layer 3)
% =====
cfg.N_SIM       = 10000;    % Jumlah iterasi Monte Carlo
cfg.CV_IC       = 0.10;     % Koefisien variasi densitas arus (10%)
cfg.CV_B        = 0.10;     % Koefisien variasi laju degradasi coating (10%)
cfg.SEED_MC     = 42;       % Random seed reproducibility

%% =====
% PARAMETER SIMULASI WAKTU
% =====
cfg.DT_HOURS    = 24.0;     % Langkah waktu simulasi (jam/hari)
cfg.DT_YEARS    = cfg.DT_HOURS / (24 * 365.25); % Konversi ke tahun
cfg.MAX_YEARS   = 10.0;    % Batas simulasi maksimum (tahun)

%% =====
% ANALISIS KEANDALAN
% =====
cfg.R90         = 0.90;     % 90% keandalan (awal zona waspada)
cfg.R80         = 0.80;     % 80% keandalan (pertimbangan penggantian)
cfg.R50         = 0.50;     % 50% keandalan (setengah populasi gagal)

%% =====
% STUDI KASUS 2 - IDEAL (Standar DNV-RP-B401)
% Material: Zinc (TMB Zinc-Anode Bolted B4)
% =====
cfg.EPSILON     = 780.0;    % Kapasitas elektrokimia seng (Ah/kg)
cfg.M_AWAL      = 3.6;      % Massa awal anoda seng (kg)
cfg.ANODE_L     = 200e-3;   % Panjang anoda (m)
cfg.ANODE_W     = 100e-3;   % Lebar anoda (m)
cfg.ANODE_H     = 30e-3;    % Tinggi anoda (m)
cfg.FC_0        = 0.02;    % Faktor kerusakan coating awal (-)

```

```

cfg.B_COAT      = 0.01;          % Laju degradasi coating linear (/tahun)
cfg.M_EFF       = cfg.M_AWAL * cfg.U_UTIL; % = 3.06 kg

%% =====
% STUDI KASUS 1 - HISTORIS (Parameter Kalibrasi Data Aktual)
% =====
% Batch 2: Zinc 3.6 kg (Des 2022 - Feb 2025)
cfg.HIST_BATCH2_M_AWAL = 3.6;      % kg
cfg.HIST_BATCH2_EPSILON = 780.0;   % Ah/kg
cfg.HIST_BATCH2_FC_0 = 0.24;      % 24% coating damage awal (reverse-
engineered)
cfg.HIST_BATCH2_B_COAT = 0.05;     % degradasi lebih cepat lingkungan agresif
cfg.HIST_BATCH2_M_EFF = cfg.HIST_BATCH2_M_AWAL * cfg.U_UTIL;
cfg.HIST_BATCH2_DUR_DAYS = 791;

% Batch 1: Aluminum 1.6 kg (2019 - Des 2022)
cfg.HIST_BATCH1_M_AWAL = 1.6;      % kg
cfg.HIST_BATCH1_EPSILON = 900.0;   % Ah/kg (Al-alloy standar DNV)
cfg.HIST_BATCH1_FC_0 = 0.09;      % 9% coating damage awal
cfg.HIST_BATCH1_B_COAT = 0.025;    % rata-rata
cfg.HIST_BATCH1_M_EFF = cfg.HIST_BATCH1_M_AWAL * cfg.U_UTIL;
cfg.HIST_BATCH1_DUR_DAYS = 1096;

end

```

### Lampiran 3. Source Code Pra-Pemrosesan Data Monitoring (data\_preprocessing.m)

```

function data = data_preprocessing()
% data_preprocessing.m
% Load dan bersihkan data monitoring CSV

csv_path = fullfile(fileparts(mfilename('fullpath')), '..', 'Data',
'monitoring_data_consolidated.csv');

% Read table
opts = detectImportOptions(csv_path);
opts = setvaropts(opts, {'Flow_Rate_Avg_m3h', 'Temp_Inlet_A_Avg_C'},
'TreatAsMissing', {'', ' ', 'NaN'});
raw_data = readtable(csv_path, opts);

% Bersihkan dan rename kolom
raw_data.Properties.VariableNames{'Flow_Rate_Avg_m3h'} = 'Flow_Rate';
raw_data.Properties.VariableNames{'Temp_Inlet_A_Avg_C'} = 'Temp_Inlet';

% Urutkan berdasarkan tanggal & hilangkan duplikat
[~, uniqueIdx] = unique(raw_data.Date, 'first');
raw_data = raw_data(uniqueIdx, :);
raw_data = sortrows(raw_data, 'Date');

% Tambahkan Temp_K
raw_data.Temp_K = raw_data.Temp_Inlet + 273.15;

% Extract valid time series (where both Flow_Rate and Temp_Inlet are valid)
valid_idx = ~isnan(raw_data.Flow_Rate) & ~isnan(raw_data.Temp_Inlet);
valid_data = raw_data(valid_idx, :);

```

```

% Calculate reference values
refs.v_ref = mean(valid_data.Flow_Rate);
refs.T_mean_C = mean(valid_data.Temp_Inlet);
refs.T_mean_K = mean(valid_data.Temp_K);

% Pack output
data.raw = raw_data;
data.valid = valid_data;
data.refs = refs;

% Print summary
fprintf('=====\n');
fprintf('RINGKASAN DATA MONITORING OPERASIONAL\n');
fprintf('=====\n');
fprintf('Total baris data      : %d\n', height(raw_data));
fprintf('Periode                : %s s/d %s\n\n', datestr(min(raw_data.Date)),
datestr(max(raw_data.Date)));

cols = {'Flow_Rate', 'Temp_Inlet'};
labels = {'Laju Aliran (m^3/h)', 'Temperatur (C)'};
for i = 1:2
    col = cols{i};
    valid_vals = raw_data.(col)(~isnan(raw_data.(col)));
    fprintf(' %s\n', labels{i});
    fprintf('   Data valid      : %d hari\n', length(valid_vals));
    fprintf('   Missing values   : %d hari\n', sum(isnan(raw_data.(col))));
    fprintf('   Mean             : %.2f\n', mean(valid_vals));
    fprintf('   Std              : %.2f\n', std(valid_vals));
    fprintf('   Min / Max        : %.2f / %.2f\n\n', min(valid_vals),
max(valid_vals));
end

fprintf(' Referensi v_ref (flow rata-rata) : %.2f m^3/h\n', refs.v_ref);
fprintf(' Referensi T_mean                : %.2f C = %.2f K\n',
refs.T_mean_C, refs.T_mean_K);
fprintf('=====\n\n');
end

```

#### Lampiran 4. Source Code Layer 1 – Model Deterministik Baseline (layer1\_deterministic.m)

```

function result = layer1_deterministic(cfg)
% layer1_deterministic.m
% Layer 1: Model Deterministik Baseline
% Implementasi Persamaan 2.1 – 2.4 (DNV-RP-B401)

dt_h = cfg.DT_YEARS * 24 * 365.25; % dt dalam jam

times = [];
mass_total = [];
fc_list = [];
Ic_list = [];

W_total = 0.0;
t = 0.0;
TTF = NaN;

```

```

while t <= cfg.MAX_YEARS
    % Persamaan linear coating
    fc = cfg.FC_0 + cfg.B_COAT * t;
    fc = min(max(fc, 0.0), 1.0); % clip 0-1

    % Arus proteksi baseline
    Ic = cfg.AC * cfg.IC_DESIGN * fc;

    % Massa Aus per step (Pers 2.9) dalam kg
    dw = Ic * dt_h / cfg.EPSILON;

    W_total = W_total + dw;

    times(end+1) = t;
    mass_total(end+1) = W_total;
    fc_list(end+1) = fc;
    Ic_list(end+1) = Ic;

    if W_total >= cfg.M_EFF && isnan(TTF)
        TTF = t;
        break;
    end

    t = t + cfg.DT_YEARS;
end

if isnan(TTF)
    TTF = cfg.MAX_YEARS;
end

result.times_years = times;
result.mass_consumed = mass_total;
result.fc_values = fc_list;
result.Ic_values = Ic_list;
result.M_eff = cfg.M_EFF;
result.TTF_years = TTF;
result.TTF_days = TTF * 365.25;
result.TTF_months = TTF * 12;

fprintf('=====\n');
fprintf('LAYER 1 - MODEL DETERMINISTIK BASELINE (SK2)\n');
fprintf('=====\n');
fprintf('  Massa efektif anoda   : %.3f kg\n', result.M_eff);
fprintf('  TTF (Time-to-Failure): %.3f tahun\n', result.TTF_years);
fprintf('                        %.1f bulan\n', result.TTF_months);
fprintf('                        %.0f hari\n', result.TTF_days);
if ~isempty(result.Ic_values)
    fprintf('  Arus awal (t=0)       : %.4f A\n', result.Ic_values(1));
    fprintf('  Arus akhir (TTF)      : %.4f A\n', result.Ic_values(end));
    fprintf('  f_c awal              : %.4f\n', result.fc_values(1));
    fprintf('  f_c akhir (TTF)       : %.4f\n', result.fc_values(end));
end
fprintf('=====\n\n');
end

```

## Lampiran 5. Source Code Layer 2 – Model Dinamis Berbasis Fisika (layer2\_dynamic.m)

```
function result = layer2_dynamic(cfg, valid_data, refs)
% layer2_dynamic.m
% Layer 2: Model Dinamis Berbasis Fisika (SK2 Ideal)
% Faktor koreksi fisika:
%   - Arrhenius (koreksi temperatur, Pers. 2.6)
%   - Power-Law (koreksi kecepatan aliran, Pers. 2.7)

dt_h = 24.0; % 1 langkah baris data = 1 hari = 24 jam

times_days = zeros(height(valid_data), 1);
times_years = zeros(height(valid_data), 1);
mass_total = zeros(height(valid_data), 1);
Ic_baseline = zeros(height(valid_data), 1);
FT_list = zeros(height(valid_data), 1);
FF_list = zeros(height(valid_data), 1);
Ic_dynamic = zeros(height(valid_data), 1);

W_total = 0.0;
TTF = NaN;

for i = 1:height(valid_data)
    % Waktu
    t_years = (i - 1) * cfg.DT_YEARS;
    t_days = (i - 1) * 1.0;

    % 1. Arus Baseline (Pers 2.4)
    fc = min(max(cfg.FC_0 + cfg.B_COAT * t_years, 0.0), 1.0);
    Ic_b = cfg.AC * cfg.IC_DESIGN * fc;

    % 2. Faktor Koreksi Temperatur Arrhenius (Pers 2.6)
    T_K = valid_data.Temp_K(i);
    FT_val = exp(-cfg.EA_ZN / cfg.R_UNIVERSAL * (1.0 / T_K - 1.0 /
cfg.T_REF));

    % 3. Faktor Koreksi Aliran Power-Law (Pers 2.7)
    v = valid_data.Flow_Rate(i);
    v_ratio = max(v / refs.v_ref, 1e-6);
    FF_val = v_ratio ^ cfg.M_FLOW;

    % 4. Arus Dinamis (Pers 2.8)
    Ic_d = Ic_b * FT_val * FF_val;

    % 5. Konsumsi Massa Inkremental per step (24 jam)
    dw = Ic_d * dt_h / cfg.EPSILON;
    W_total = W_total + dw;

    % Save arrays (Hanya data historik pendek ini)
    times_days(i) = t_days;
    times_years(i) = t_years;
    mass_total(i) = W_total;
    Ic_baseline(i) = Ic_b;
    FT_list(i) = FT_val;
    FF_list(i) = FF_val;
    Ic_dynamic(i) = Ic_d;
end
```

```

        if W_total >= cfg.M_EFF && isnan(TTF)
            TTF = t_years;
            break;
        end

        if t_years >= cfg.MAX_YEARS
            break;
        end
    end

    if isnan(TTF)
        TTF = cfg.MAX_YEARS;
    end

    % Pack outputs
    result.times_days = times_days(1:i);
    result.times_years = times_years(1:i);
    result.mass_consumed = mass_total(1:i);
    result.Ic_baseline = Ic_baseline(1:i);
    result.FT_values = FT_list(1:i);
    result.FF_values = FF_list(1:i);
    result.Ic_dynamic = Ic_dynamic(1:i);
    result.M_eff = cfg.M_EFF;
    result.v_ref = refs.v_ref;
    result.TTF_years = TTF;
    result.TTF_months = TTF * 12;
    result.TTF_days = TTF * 365.25;

    fprintf('=====\n');
    fprintf('LAYER 2 - MODEL DINAMIS BERBASIS FISIKA (SK2)\n');
    fprintf('=====\n');
    fprintf('  Data pendek aktual    : %d hari\n', length(result.times_days));
    fprintf('  TTF (Time-to-Failure): %.3f tahun\n', result.TTF_years);
    fprintf('                        : %.1f bulan\n', result.TTF_months);
    fprintf('                        : %.0f hari\n', result.TTF_days);
    fprintf('  v_ref (rata-rata)     : %.2f m3/h\n', result.v_ref);
    if ~isempty(result.FT_values)
        fprintf('    F_T rata-rata       : %.4f\n', mean(result.FT_values));
        fprintf('    F_F rata-rata       : %.4f\n', mean(result.FF_values));
        fprintf('    I_c dinamis rata-rata: %.5f A\n', mean(result.Ic_dynamic));
    end
    fprintf('=====\n\n');
end

function ttf = layer2_dynamic_synthetic(cfg, refs, ic_override, b_override)
    ic_val = cfg.IC_DESIGN;
    if nargin >= 3 && ~isempty(ic_override)
        ic_val = ic_override;
    end

    b_val = cfg.B_COAT;
    if nargin >= 4 && ~isempty(b_override)
        b_val = b_override;
    end
end

```

```

dt_h = cfg.DT_YEARS * 24 * 365.25;

% Faktor fisika konstan
FT_const = exp(-cfg.EA_ZN / cfg.R_UNIVERSAL * (1.0 / refs.T_mean_K - 1.0 /
cfg.T_REF));
FF_const = (refs.v_ref / refs.v_ref) ^ cfg.M_FLOW; % 1.0

W_total = 0.0;
t = 0.0;

while t <= cfg.MAX_YEARS
    fc = min(max(cfg.FC_0 + b_val * t, 0.0), 1.0);
    Ic_b = cfg.AC * ic_val * fc;
    Ic_d = Ic_b * FT_const * FF_const;

    dw = Ic_d * dt_h / cfg.EPSILON;
    W_total = W_total + dw;

    if W_total >= cfg.M_EFF
        ttf = t;
        return;
    end
    t = t + cfg.DT_YEARS;
end
ttf = cfg.MAX_YEARS;
end

```

## Lampiran 6. Source Code Layer 3 – Simulasi Monte Carlo dan Analisis Weibull (layer3\_montecarlo.m)

```

function [mc_result, weibull_result] = layer3_montecarlo(cfg, refs)
% layer3_montecarlo.m
% Layer 3: Model Stokastik - Simulasi Monte Carlo
% Parameter stokastik (distribusi Normal, CV=10%):
%   - ic ~ N(mean, mean * 0.10)
%   - b ~ N(mean, mean * 0.10)
% serta pencocokan parameter Weibull

rng(cfg.SEED_MC);

ic_samples = normrnd(cfg.IC_DESIGN, cfg.IC_DESIGN * cfg.CV_IC, [cfg.N_SIM,
1]);
b_samples = normrnd(cfg.B_COAT, cfg.B_COAT * cfg.CV_B, [cfg.N_SIM, 1]);

% Clip ke positif
ic_samples = max(ic_samples, 1e-6);
b_samples = max(b_samples, 1e-6);

TTF_array = zeros(cfg.N_SIM, 1);

fprintf('Menjalankan Simulasi Monte Carlo (%d iterasi)...\n', cfg.N_SIM);
for k = 1:cfg.N_SIM
    TTF_array(k) = run_synthetic(cfg, refs, ic_samples(k), b_samples(k));
end

```

```

%% Statistik Monte Carlo
stats.N_sim = cfg.N_SIM;
stats.mean_years = mean(TTF_array);
stats.std_years = std(TTF_array);
stats.median = median(TTF_array);
stats.P5 = prctile(TTF_array, 5);
stats.P25 = prctile(TTF_array, 25);
stats.P75 = prctile(TTF_array, 75);
stats.P95 = prctile(TTF_array, 95);
stats.min = min(TTF_array);
stats.max = max(TTF_array);

stats.mean_months = stats.mean_years * 12;
stats.P5_months = stats.P5 * 12;
stats.P95_months = stats.P95 * 12;

mc_result.TTF_array = TTF_array;
mc_result.ic_samples = ic_samples;
mc_result.b_samples = b_samples;
mc_result.stats = stats;

fprintf('=====\n');
fprintf('LAYER 3 - SIMULASI MONTE CARLO\n');
fprintf('=====\n');
fprintf('  Jumlah iterasi      : %d\n', stats.N_sim);
fprintf('  TTF Mean            : %.3f tahun (%.1f bulan)\n',
stats.mean_years, stats.mean_months);
fprintf('  TTF Std Dev         : %.3f tahun\n', stats.std_years);
fprintf('  TTF Median          : %.3f tahun\n', stats.median);
fprintf('  TTF P5 (5%)         : %.3f tahun (%.1f bulan)\n', stats.P5,
stats.P5_months);
fprintf('  TTF P95 (95%)       : %.3f tahun (%.1f bulan)\n', stats.P95,
stats.P95_months);
fprintf('  Interval kepercayaan : [%.1f - %.1f] bulan (90%% CI)\n',
stats.P5_months, stats.P95_months);

fprintf('=====\n');

%% Keandalan Weibull (Menggunakan wblfit)
pd = fitdist(TTF_array, 'Weibull');
beta = pd.B;    % Shape parameter
eta = pd.A;     % Scale parameter

% Prediksi sisa umur
% Cek batas t
t_range = linspace(1e-6, max(TTF_array)*1.2, 100);
cdf_wbl = cdf(pd, t_range);
R_wbl = 1 - cdf_wbl; % Fungsi Survival

wbl_stat.shape_beta = beta;
wbl_stat.scale_eta = eta;
wbl_stat.mean = pd.mean;
wbl_stat.median = pd.median;
wbl_stat.var = pd.var;

% Cari TTF R(t) = 0.90, 0.80, 0.50

```

```

wbl_stat.t_R90 = icdf(pd, 1 - 0.90);
wbl_stat.t_R80 = icdf(pd, 1 - 0.80);
wbl_stat.t_R50 = icdf(pd, 1 - 0.50);

weibull_result.fit_dist = pd;
weibull_result.stats = wbl_stat;
weibull_result.R_curve = struct('t', t_range, 'R', R_wbl);

fprintf('=====\\n');
fprintf('ANALISIS KEANDALAN (DISTRIBUSI WEIBULL)\\n');
fprintf('=====\\n');
fprintf(' Parameter Bentuk (beta) : %.4f\\n', beta);
fprintf(' Parameter Skala (eta) : %.4f tahun\\n', eta);
fprintf(' Mean TTF Weibull : %.3f tahun\\n', wbl_stat.mean);
fprintf(' Waktu u/ Keandalan 90%% : %.3f tahun (Rekomendasi
Inspeksi)\\n', wbl_stat.t_R90);
fprintf(' Waktu u/ Keandalan 50%% : %.3f tahun (Median Failure)\\n',
wbl_stat.t_R50);

fprintf('=====\\n\\n');

end

function ttf = run_synthetic(cfg, refs, ic_override, b_override)
    dt_h = cfg.DT_YEARS * 24 * 365.25;

    FT_const = exp(-cfg.EA_ZN / cfg.R_UNIVERSAL * (1.0 / refs.T_mean_K - 1.0 /
cfg.T_REF));
    FF_const = 1.0;

    W_total = 0.0;
    t = 0.0;

    while t <= cfg.MAX_YEARS
        fc = min(max(cfg.FC_0 + b_override * t, 0.0), 1.0);
        Ic_b = cfg.AC * ic_override * fc;
        Ic_d = Ic_b * FT_const * FF_const;

        dw = Ic_d * dt_h / cfg.EPSILON;
        W_total = W_total + dw;

        if W_total >= cfg.M_EFF
            ttf = t;
            return;
        end
        t = t + cfg.DT_YEARS;
    end
    ttf = cfg.MAX_YEARS;
end

```

#### Lampiran 7. Source Code Analisis Historis dan Estimasi Sisa Umur Pakai (historical\_analysis.m)

```

function [hist_records, hist_gaps, current_status] = historical_analysis(cfg,
r1_ideal, r3_wb_stats)

```

```

% historical_analysis.m
% Studi Kasus 1 - Analisis Data Historis Penggantian Anoda Korban
% PLTGU Tanjung Uncang

%% DATA HISTORIS PENGGANTIAN ANODA
history(1).batch = 1;
history(1).label = 'Batch 1 - Al-alloy Disk (2019-2022)';
history(1).material = 'Aluminum Alloy Bolted Hull';
history(1).bentuk = 'Lingkaran/Disk';
history(1).M_awal = 1.6; % kg
history(1).epsilon = 900.0; % Ah/kg
history(1).install_date = datetime(2019, 1, 1);
history(1).fail_date = datetime(2022, 12, 1);
history(1).failure_mode = 'Habis total - hanya tersisa baut penyangga.
Akibatnya terjadi korosi agresif dan kebocoran waterbox.';
history(1).catatan = 'Pemasangan pertama sistem proteksi katodik.';

history(2).batch = 2;
history(2).label = 'Batch 2 - Zn TMB B4 (Des 2022-Feb 2025)';
history(2).material = 'Zinc 99% TMB Zinc-Anode Bolted';
history(2).bentuk = 'Balok Persegi (B4)';
history(2).M_awal = 3.6; % kg
history(2).epsilon = 780.0; % Ah/kg
history(2).install_date = datetime(2022, 12, 1);
history(2).fail_date = datetime(2025, 2, 1);
history(2).failure_mode = 'Habis total saat inspeksi Februari 2025. Anoda
ini adalah yang terpasang saat ini (referensi simulasi SK2).';
history(2).catatan = 'Upgrade material & massa untuk memperpanjang umur
pakai.';

%% 1. Menghitung Umur Pakai Aktual & FC_0 Reversed
hist_records = [];
for i = 1:length(history)
    h = history(i);
    delta_days = days(h.fail_date - h.install_date);
    dur_years = delta_days / 365.25;
    dur_months = delta_days / 30.44;

    M_eff = h.M_awal * cfg.U_UTIL;
    Ah_total = M_eff * h.epsilon;
    I_avg = Ah_total / (delta_days * 24.0);

    FC_0_rev = I_avg / (cfg.AC * cfg.IC_DESIGN);

    rec = h;
    rec.duration_days = delta_days;
    rec.duration_years = dur_years;
    rec.duration_months = dur_months;
    rec.M_eff = M_eff;
    rec.Ah_total = Ah_total;
    rec.I_avg_A = I_avg;
    rec.FC_0_reversed = FC_0_rev;

    hist_records = [hist_records; rec];
end

```

```

%% 2. Analisis Gap Aktual vs Ideal (Layer 1)
ideal_TTF_months = r1_ideal.TTF_months;
ideal_FC_0 = cfg.FC_0;

hist_gaps = [];
for i = 1:length(hist_records)
    rec = hist_records(i);
    gap_TTF_months = ideal_TTF_months - rec.duration_months;
    ratio_TTF = ideal_TTF_months / rec.duration_months;

    gap_FC = rec.FC_0_reversed - ideal_FC_0;
    ratio_FC = rec.FC_0_reversed / ideal_FC_0;

    if ratio_TTF >= 3
        severity = 'KRITIS - Konsumsi jauh melebihi prediksi ideal';
    elseif ratio_TTF >= 2
        severity = 'BERAT - Konsumsi 2x lebih cepat dari ideal';
    else
        severity = 'SEDANG - Masih terprediksi dengan margin';
    end

    gap_out.batch = rec.batch;
    gap_out.label = rec.label;
    gap_out.TTF_aktual_months = rec.duration_months;
    gap_out.TTF_ideal_months = ideal_TTF_months;
    gap_out.gap_TTF_months = gap_TTF_months;
    gap_out.rasio_TTF = ratio_TTF;
    gap_out.FC_aktual = rec.FC_0_reversed;
    gap_out.FC_ideal = ideal_FC_0;
    gap_out.gap_FC = gap_FC;
    gap_out.rasio_FC = ratio_FC;
    gap_out.severity = severity;

    hist_gaps = [hist_gaps; gap_out];
end

%% Cetak Ringkasan Historis
fprintf('=====\n');
fprintf('STUDI KASUS 1 - ANALISIS DATA HISTORIS PENGGANTIAN ANODA\n');
fprintf('Sumber: History Penggantian Anoda.pdf\n');
fprintf('=====\n');

for i = 1:length(hist_records)
    rec = hist_records(i);
    fprintf('\n [%s]\n', rec.label);
    fprintf(' Material      : %s (%s)\n', rec.material, rec.bentuk);
    fprintf(' Massa awal      : %.2f kg | M_eff = %.2f kg\n', rec.M_awal,
rec.M_eff);
    fprintf(' Periode         : %s -> %s\n', datestr(rec.install_date),
datestr(rec.fail_date));
    fprintf(' TTF AKTUAL      : %d hari = %.1f bulan = %.2f tahun\n',
rec.duration_days, rec.duration_months, rec.duration_years);
    fprintf(' I_avg (est.)    : %.4f A\n', rec.I_avg_A);
    fprintf(' FC_0 (rev.)     : %.4f (%.1f%%)\n', rec.FC_0_reversed,
rec.FC_0_reversed*100);
    fprintf(' Mode kegagalan: %s\n', rec.failure_mode);
end

```

```

        fprintf(' Catatan           : %s\n', rec.catatan);
    end

    fprintf('\n-----\n');
    fprintf(' ANALISIS GAP: Aktual vs Ideal (SK2)\n');
    fprintf('-----\n');
    fprintf(' TTF IDEAL (SK2 Simulasi) : %.1f bulan\n', ideal_TTF_months);
    if nargin >= 3 && ~isempty(r3_wb_stats)
        fprintf(' TTF IDEAL MC Mean           : %.1f bulan\n', r3_wb_stats.mean *
12);
        fprintf(' TTF IDEAL 90%% CI           : [%.1f - %.1f] bulan\n',
r3_wb_stats.t_R90 * 12, icdf('Weibull', 0.95, r3_wb_stats.scale_eta,
r3_wb_stats.shape_beta) * 12);
    end

    for i = 1:length(hist_gaps)
        g = hist_gaps(i);
        fprintf('\n Batch %d: %s\n', g.batch, g.label);
        fprintf(' TTF Aktual           : %.1f bln\n', g.TTF_actual_months);
        fprintf(' Gap vs Ideal         : %.1f bln (Ideal %.1fx lebih lama)\n',
g.gap_TTF_months, g.rasio_TTF);
        fprintf(' FC Aktual           : %.1f%% vs FC Ideal: %.1f%% (Aktual
%.1fx lebih rusak)\n', g.FC_actual*100, g.FC_ideal*100, g.rasio_FC);
        fprintf(' GAYA: %s\n', g.severity);
    end
    fprintf('===== \n\n');

    %% 3. Status Anoda Terpasang Saat Ini (Batch 3)
    curr_date = datetime(2026, 3, 1); % Simulasi t saat ini

    ca.batch = 3;
    ca.label = 'Batch 3 - Zn TMB B4 (Feb 2025 - sekarang)';
    ca.material = 'Zinc 99% TMB Zinc-Anode Bolted';
    ca.bentuk = 'Balok Persegi (B4)';
    ca.M_awal = 3.6;
    ca.epsilon = 780.0;
    ca.install_date = datetime(2025, 2, 1);

    M_eff_ca = ca.M_awal * cfg.U_UTIL;
    elapsed_days = days(curr_date - ca.install_date);
    elapsed_months = elapsed_days / 30.44;
    elapsed_years = elapsed_days / 365.25;

    % Skenario 1 - IDEAL
    w_now_ideal = interp1(r1_ideal.times_years, r1_ideal.mass_consumed,
elapsed_years, 'linear', 'extrap');
    pct_ideal = (w_now_ideal / M_eff_ca) * 100.0;
    remaining_ideal_months = (r1_ideal.TTF_years * 12) - elapsed_months;

    % Skenario 2 - PREDIKSI AKTUAL (Mendasarkan pada Batch 2 karna sama 3.6kg)
    batch2 = hist_records(2);
    rate_actual_kg_month = batch2.M_eff / batch2.duration_months;

    w_now_actual = rate_actual_kg_month * elapsed_months;
    w_now_actual = min(w_now_actual, M_eff_ca);
    pct_actual = (w_now_actual / M_eff_ca) * 100.0;

```

```

TTF_predicted_months = batch2.duration_months;
remaining_actual_months = max(TTF_predicted_months - elapsed_months, 0);

fail_date_predicted = ca.install_date + days(round(TTF_predicted_months *
30.44));

current_status.anode_info = ca;
current_status.current_date = curr_date;
current_status.install_date = ca.install_date;
current_status.elapsed_days = elapsed_days;
current_status.elapsed_months = elapsed_months;
current_status.elapsed_years = elapsed_years;
current_status.M_eff = M_eff_ca;

current_status.ideal.w_consumed_now = w_now_ideal;
current_status.ideal.pct_consumed = pct_ideal;
current_status.ideal.remaining_months = remaining_ideal_months;
current_status.ideal.TTF_total_months = r1_ideal.TTF_years * 12;

current_status.actual_pred.rate_kg_per_month = rate_actual_kg_month;
current_status.actual_pred.basis = sprintf('Batch 2 (TTF aktual=%.1f bln)',
batch2.duration_months);
current_status.actual_pred.w_consumed_now = w_now_actual;
current_status.actual_pred.pct_consumed = pct_actual;
current_status.actual_pred.remaining_months = remaining_actual_months;
current_status.actual_pred.TTF_total_months = TTF_predicted_months;
current_status.actual_pred.fail_date_predicted = fail_date_predicted;

%% Cetak Status Saat Ini
fprintf('=====\\n');
fprintf('ESTIMASI STATUS ANODA TERPASANG SAAT INI\\n');
fprintf('Anoda: %s (%s), %.2f kg\\n', ca.material, ca.bentuk, ca.M_awal);
fprintf('Dipasang: %s | Sekarang: %s\\n', datestr(ca.install_date),
datestr(curr_date));
fprintf('Telah beroperasi: %.1f bulan (%d hari)\\n', elapsed_months,
elapsed_days);
fprintf('=====\\n');

fprintf(' SKENARIO 1 - IDEAL (Standar DNV, FC_0=2%)\\n');
fprintf('   Massa terkonsumsi   : %.3f kg (%.1f%% dari M_eff)\\n',
w_now_ideal, pct_ideal);
fprintf('   Sisa umur estimasi   : %.1f bulan\\n', remaining_ideal_months);
fprintf('   TTF total ideal      : %.1f bulan\\n',
current_status.ideal.TTF_total_months);
fprintf('   Status                : Masih sangat aman (kondisi ideal)\\n\\n');

fprintf(' SKENARIO 2 - PREDIKSI AKTUAL (Berbasis Historis Batch 2)\\n');
fprintf('   Basis perhitungan    : %s\\n', current_status.actual_pred.basis);
fprintf('   Laju konsumsi        : %.4f kg/bulan\\n', rate_actual_kg_month);
fprintf('   Massa terkonsumsi    : %.3f kg (%.1f%% dari M_eff)\\n',
w_now_actual, pct_actual);
fprintf('   Sisa umur estimasi   : %.1f bulan\\n', remaining_actual_months);
fprintf('   Prediksi habis       : %s (~%.0f bulan total)\\n',
datestr(fail_date_predicted), TTF_predicted_months);

```

```

if remaining_actual_months <= 6
    fprintf('\n >>> PERINGATAN: Sisa umur <= 6 bulan! Siapkan penggantian
<<<\n');
elseif remaining_actual_months <= 12
    fprintf('\n >>> WASPADA: Sisa umur <= 12 bulan. Jadwalkan inspeksi.
<<<\n');
end

fprintf('\n-----\n');
fprintf(' REKOMENDASI:\n');
fprintf(' Berdasarkan pola historis, anoda diestimasi habis sekitar\n');
fprintf(' %s. Disarankan untuk:\n', datestr(fail_date_predicted, 'mmm
yyyy'));
fprintf(' 1. Melakukan inspeksi visual kondisi anoda sebelum %s\n',
datestr(fail_date_predicted, 'mmm yyyy'));
fprintf(' 2. Menyiapkan anoda pengganti minimal 3 bulan sebelum batas
prediksi habis\n');
fprintf(' 3. Mempertimbangkan peningkatan massa anoda atau perbaikan\n');
fprintf(' coating untuk memperpanjang umur siklus proteksi\n');
fprintf('=====\\n\\n');
end

```

#### Lampiran 8. Source Code Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA) (lcca\_analysis.m)

```

function lcca_out = lcca_analysis(TTF_aktual_tahun)
% lcca_model.m
% Menghitung LCCA (SK3)
% Asumsi:
% 1. Harga anoda 3.6kg Rp 150.000/kg x 15 qty
% 2. Jasa pasang Rp 15.000.000
% 3. Corrective Perbaikan Waterbox Rp 75.000.000
% 4. Downtime STG 40 MW x 72 jam x Tarif

%% PARAMETER LCCA
HARGA_ANODA_PER_KG = 150000;
MASSA_ANODA_KG = 3.6;
JUMLAH_ANODA = 15;
BIAYA_MATERIAL = HARGA_ANODA_PER_KG * MASSA_ANODA_KG * JUMLAH_ANODA;
BIAYA_JASA_PASANG = 15000000;

C_REPLACE = BIAYA_MATERIAL + BIAYA_JASA_PASANG;

% Biaya direct risk
C_REPAIR = 75000000;

% Biaya downtime
STG_CAPACITY_KW = 40000;
DOWNTIME_JAM = 72;
TARIF_LISTRIK = 1114.74;
C_DOWNTIME = STG_CAPACITY_KW * DOWNTIME_JAM * TARIF_LISTRIK;

% Financial params
DISCOUNT_RATE = 0.08;
HORIZON_TAHUN = 10;

%% SKENARIO 1: PREVENTIVE
% Preventif diambil sedikit di bawah TTF aktual, misal 90% (inspeksi aman)

```

```

interval_prev = TTF_aktual_tahun * 0.90;
waktu_ganti = interval_prev:interval_prev:HORIZON_TAHUN;

npv_prev = 0.0;
cf_prev = [];
for i = 1:length(waktu_ganti)
    t = waktu_ganti(i);
    pv = C_REPLACE / ((1 + DISCOUNT_RATE) ^ t);
    npv_prev = npv_prev + pv;
    cf_prev = [cf_prev; struct('tahun', t, 'biaya', C_REPLACE, 'pv', pv)];
end

%% SKENARIO 2: RUN-TO-FAILURE
total_cost_failure = C_REPLACE + C_REPAIR + C_DOWNTIME;
waktu_gagal = TTF_aktual_tahun:TTF_aktual_tahun:HORIZON_TAHUN;

npv_rtf = 0.0;
cf_rtf = [];
for i = 1:length(waktu_gagal)
    t = waktu_gagal(i);
    pv = total_cost_failure / ((1 + DISCOUNT_RATE) ^ t);
    npv_rtf = npv_rtf + pv;
    cf_rtf = [cf_rtf; struct('tahun', t, 'biaya', total_cost_failure, 'pv',
pv)];
end

%% OUTPUT CETA RINGKASAN
fprintf('=====\n');
fprintf('STUDI KASUS LCCA (LIFE CYCLE COST ANALYSIS)\n');
fprintf('=====\n');
fprintf('  Biaya Penggantian (C_replace) : Rp %s\n', num2str(C_REPLACE,
'%10.2f'));
fprintf('  Biaya Perbaikan (C_repair) : Rp %s\n', num2str(C_REPAIR,
'%10.2f'));
fprintf('  Biaya Downtime (C_dt) : Rp %s\n', num2str(C_DOWNTIME,
'%10.2f'));
fprintf('-----\n');
fprintf('  Total Biaya 1x Kegagalan : Rp %s\n',
num2str(total_cost_failure, '%10.2f'));
fprintf('=====\n');
fprintf('Perbandingan Horizon %d Tahun (Suku Bunga %.1f%%):\n',
HORIZON_TAHUN, DISCOUNT_RATE*100);
fprintf('1. Strategi Preventive (Ganti tiap %.1f tahun / %.1f bulan):\n',
interval_prev, interval_prev*12);
fprintf('  -> Total LCC (NPV) = Rp %s\n', num2str(npv_prev, '%10.2f'));
fprintf('2. Strategi Run-to-Failure (Bocor tiap %.1f tahun / %.1f bulan):\n',
TTF_aktual_tahun, TTF_aktual_tahun*12);
fprintf('  -> Total LCC (NPV) = Rp %s\n', num2str(npv_rtf, '%10.2f'));
fprintf('=====\n\n');

%% Pack Return
lcca_out.params.C_REPLACE = C_REPLACE;
lcca_out.params.C_REPAIR = C_REPAIR;
lcca_out.params.C_DOWNTIME = C_DOWNTIME;
lcca_out.params.TOTAL_FAIL = total_cost_failure;
lcca_out.params.DISCOUNT = DISCOUNT_RATE;

```

```
lcca_out.params.HORIZON = HORIZON_TAHUN;

lcca_out.preventive.interval = interval_prev;
lcca_out.preventive.npv = npv_prev;
lcca_out.preventive.cf = cf_prev;

lcca_out.rtf.interval = TTF_aktual_tahun;
lcca_out.rtf.npv = npv_rtf;
lcca_out.rtf.cf = cf_rtf;

end
```