SKRIPSI

ANALISIS TEKNIS *OVERHEATING* PADA *CARBON BRUSH* DAN STRATEGI PENANGANAN UNTUK OPTIMALISASI KEANDALAN SISTEM EKSITASI GENERATOR DI PLTA TULUNGAGUNG MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE* (PSO)

Disusun Oleh :

Teguh Wicaksono
NIM. 20241330020

Dosen Pembimbing :
Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T.
Reynanda Bagus Widyo Astomo, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURABAYA

2026

SKRIPSI

ANALISIS TEKNIS *OVERHEATING* PADA *CARBON BRUSH* DAN STRATEGI PENANGANAN UNTUK OPTIMALISASI KEANDALAN SISTEM EKSITASI GENERATOR DI PLTA TULUNGAGUNG MENGGUNAKAN METODE *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)

Teguh Wicaksono
NIM 20241330020

Dosen pembimbing :
Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T.
Reynanda Bagus Widyo Astomo, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURABAYA
2026

THESIS

TECHNICAL ANALYSIS OF CARBON BRUSH OVERHEATING AND MITIGATION STRATEGIES FOR OPTIMIZING THE RELIABILITY OF THE GENERATOR EXCITATION SYSTEM AT TULUNGAGUNG HYDROELECTRIC POWER PLANT USING THE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) METHOD

Teguh Wicaksono
NIM 20241330020

Dosen pembimbing :
Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T.
Reynanda Bagus Widyo Astomo, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURABAYA
2026

LEMBAR PEMBIMBING SKRIPSI

ANALISIS TEKNIS OVERHEATING PADA CARBON BRUSH DAN STRATEGI PENANGANAN UNTUK OPTIMALISASI KEANDALAN SISTEM EKSITASI GENERATOR DI PLTA TULUNGAGUNG MENGGUNAKAN METODE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

TUGAS AKHIR
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surabaya

Oleh :
Teguh Wicaksono
NIM 20241330020

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T. (.....)
2. Reynanda Bagus Widyo Astomo, S.T., M.T. (.....)

SURABAYA
JUNI, 2026

LEMBAR PENGUJI SKRIPSI

ANALISIS TEKNIS OVERHEATING PADA CARBON BRUSH DAN STRATEGI PENANGANAN UNTUK OPTIMALISASI KEANDALAN SISTEM EKSITASI GENERATOR DI PLTA TULUNGAGUNG MENGGUNAKAN METODE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

TUGAS AKHIR
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surabaya

Oleh :
Teguh Wicaksono
NIM 20241330020

Dosen Penguji	**Tanda Tangan**
1. Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T.	.....
2. Reynanda Bagus Widyo Astomo, S.T., M.T.	.....
3. Winarno, S.T., M.T.	.....

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS TEKNIS OVERHEATING PADA CARBON BRUSH DAN STRATEGI PENANGANAN UNTUK OPTIMALISASI KEANDALAN SISTEM EKSITASI GENERATOR DI PLTA TULUNGAGUNG MENGGUNAKAN METODE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

TUGAS AKHIR
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surabaya

Oleh :
Teguh Wicaksono
NIM 20241330020

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik
Studi Teknik Elektro

Ir. Vippy Dharmawan, M.Ars
NIDN. 07.2509.6402

Disetujui oleh,
Ketua Program

Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T.
NIDN. 001.606.8101

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa	:	Teguh Wicaksono
NRP/NIM	:	20241330020
Program Studi	:	Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pemikiran saya sendiri.

Apabila kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa skripsi saya ini hasil dari jiplakan maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 30-1(-.... 2026
Yang membuat pernyataan



(Teguh Wicaksono)

Analisis Teknis *Overheating* Pada *Carbon Brush* Dan Strategi Penanganan Untuk Optimalisasi Keandalan Sistem Eksitasi Generator di PLTA Tulungagung Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Nama	:	Teguh Wicaksono
NIM	:	20241330020
Jurusan	:	Teknik Elektro
Dosen Pembimbing	:	1. Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T. 2. Reynanda Bagus Widyo Astomo, S.T., M.T.

Abstrak

Kerusakan material pada *brush holder* akibat suhu di atas 160°C telah memicu *force shutdown* pada sistem eksitasi generator PLTA Tulungagung di tahun 2022. Fenomena *overheating* pada *slip ring* dan *carbon brush exciter* ini berakar dari akumulasi parameter kerja yang buruk termasuk kondisi permukaan, tekanan pegas, isolasi, dan jumlah *brush* yang memperparah ketimpangan distribusi arus. Dalam menanggulangi isu ini, sebuah formulasi optimasi kuantitatif diajukan memanfaatkan model termal-elektrik yang mengacu pada persamaan pendinginan Newton dan hukum kontak listrik Holm. Proses pencarian parameter optimal dilakukan lewat algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) melalui 100 iterasi dan 30 partikel. Optimasi ini menggunakan fungsi *multi-objective* (bobot 0,7 untuk penalaran suhu dan 0,3 untuk stabilitas arus) demi mencapai performa eksitasi yang aman dan seimbang.

Model termal untuk PLTA Tulungagung berhasil dirancang dengan tingkat presisi yang sangat tinggi. Berdasarkan pengujian data operasional dari tahun 2023 sampai 2025, sistem ini menghasilkan nilai MAPE hanya 0,89%. Menurut standar Lewis (1982), performa dengan persentase eror sekecil ini sah masuk ke dalam kelompok *highly accurate*.

Menariknya, lewat optimasi PSO, ditemukan sebuah formula ideal untuk menjaga kesehatan mesin. Formula tersebut merekomendasikan tekanan pegas (P*) sebesar 2,7387 kgf/cm², jumlah *brush* (N*) sebanyak 24 unit, serta tahanan isolasi (R iso) senilai 100 M .

Langkah intervensi ini diproyeksikan mampu menurunkan suhu kerja mesin dari 130,03°C menjadi 127,00°C (turun 2,3%). Tak hanya itu, ketidakseimbangan arus juga berhasil dipangkas sebesar 11,5% relatif. Di luar manfaatnya dalam meredam risiko *overheating*, hasil riset ini menjadi fondasi kuat bagi tim berbasis di lapangan untuk merancang agenda pemeliharaan preventif dan prediktif yang jauh lebih terukur.

Kata kunci: *Carbon Brush*, *Slip Ring*, *Overheating*, Sistem Eksitasi, *Particle Swarm Optimization*, Model Termal-Elektrik, PLTA Tulungagung

Analisis Teknis *Overheating* Pada *Carbon Brush* Dan Strategi Penanganan Untuk Optimalisasi Keandalan Sistem Eksitasi Generator di PLTA Tulungagung Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Nama	:	Teguh Wicaksono
NIM	:	20241330020
Jurusan	:	Teknik Elektro
Dosen Pembimbing	:	1. Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T. 2. Reynanda Bagus Widyo Astomo, S.T., M.T.

Abstract

Material damage to the brush holder caused by temperatures exceeding 160°C triggered a force shutdown of the excitation system at Tulungagung Hydropower Plant in 2022. This overheating phenomenon on the slip ring and carbon brush exciter originated from an accumulation of poor operating parameters, including surface condition, spring pressure, insulation resistance, and brush count, which exacerbated the imbalance of current distribution. To address this issue, a quantitative optimization formulation is proposed by leveraging a thermal-electrical model based on Newton's law of cooling and Holm's electrical contact theory. The search for optimal parameters is conducted through the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm with 100 iterations and 30 particles. This optimization employs a multi-objective function (with weights of 0.7 for thermal regulation and 0.3 for current stability) to achieve safe and balanced excitation performance.

The thermal model for Tulungagung Hydropower Plant was successfully developed with a very high level of precision. Based on operational data testing from 2023 to 2025, the system produces a MAPE of only 0.89%. According to the Lewis (1982) classification, an error percentage this small is properly categorized as highly accurate.

Notably, through PSO optimization, an ideal configuration was identified to maintain the machine's operational health. This configuration recommends a spring pressure (P) of 2.7387 kgf/cm², a brush count (N*) of 24 units, and an insulation resistance (R_iso*) of 100 MΩ.*

This intervention is projected to reduce the machine's operating temperature from 130.03°C to 127.00°C (a 2.3% decrease). Furthermore, current imbalance was also successfully reduced by 11.5% relative. Beyond its benefit in mitigating overheating risk, this research provides a solid foundation for field-based teams to design preventive and predictive maintenance programs that are significantly more measurable.

Keywords: *carbon brush, overheating, excitation system, thermal optimization, Particle Swarm Optimization, Tulungagung Hydropower Plant*

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah atas berkah dan rahmat-Nya sehingga Tugas Akhir dengan judul **Analisis Teknis *Overheating* Pada *Carbon Brush* Dan Strategi Penanganan Untuk Optimalisasi Keandalan Sistem Eksitasi Generator di PLTA Tulungagung Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)** dapat di selesaikan sesuai jadwal yang telah ditetapkan oleh Universitas Muhammadiyah Surabaya. Tugas Akhir ini merupakan syarat lulus dan mendapatkan gelar S.T. di Universitas Muhammadiyah Surabaya.

Pada kesempatan kali ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih atas bimbingan, arahan, dan kerja samanya kepada yang terhormat:

1. Dr. Muzakir, Rektor Universitas Muhammadiyah Surabaya;
2. Ir. Vippy Dharmawan, M.Arch., Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surabaya;
3. Bapak Arfan, *Senior Manager* PT PLN Nusantara Power UP Brantas;
4. Dr. Indah Kurniawati, S.T., M.T., Kepala Jurusan Program Studi Teknik Elektro sekaligus menjadi Dosen Pembimbing kami;
5. Reynanda Bagus Widyo Astomo, S.T., M.T., Dosen Pembimbing;
6. Hafid Malkan Chaironi, *Technician System Owner* UP Brantas;
7. Istriku, Novia Yuana, dan anak-anak: Arjuna Yardan Alarick, dan Elhazmi;
8. Serta pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Pada penulisan Tugas Akhir ini, penulis menyadari atas keterbatasan ilmu yang dimiliki, sehingga masih terdapat kekurangan pada tulisan ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat terutama untuk penulis dan bagi pihak yang membutuhkan.

Surabaya 20 Juni 2026

Teguh Wicaksono

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
LEMBAR PENGESAHAN ii
SURAT PERNYATAAN iii
ABSTRAK iv
ABSTRACT v
KATA PENGANTAR vi
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL viii
DAFTAR GAMBAR ix

BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Batasan Penelitian 5
1.6 Sistematika Penulisan 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 Penelitian Terdahulu 7
2.2 Landasan Teori 8
2.2.1 Sistem Eksitasi 8
2.2.1.1 Definisi Sistem Eksitasi 8
2.2.1.2 Tujuan Eksitasi 8
2.2.1.3 Jenis Sistem Eksitasi 9
2.2.2 *Carbon Brush* 9
2.2.2.1 Komposisi Material *Carbon Brush* 10
2.2.2.2 Karakteristik Material 10
2.2.2.3 Klasifikasi *Carbon Brush* 10
2.2.3 *Brush Pressure* 10
2.2.4 Geometri Kondisi *Carbon Brush* 11
2.2.5 Jumlah Maksimum *Carbon Brush* terhadap Keliling *Slip Ring* 11
2.2.6 Geometris Kondisi *Slip Ring* 13
2.2.6.1 Pengaruh *Surface Roughness* (Kekasaran Permukaan) 13
2.2.6.2 Pengaruh *Surface Roundness* dan *Ovality* 14
2.2.6.3 Mekanisme Kenaikan Suhu akibat Ovalitas 14

2.2.7 Konversi Tekanan Pegas (P) ke Gaya Kontak (F) 15
2.2.8 Mekanisme Keausan dan Stabilitas Kontak 15
2.2.9 Teori Kontak Listrik (Hukum Holm) 15
2.2.9.1 Konsep *A-Spot* dan Resistansi Konstriksi 15
2.2.9.2 Hubungan Gaya Kontak dengan Radius *A-Spot* 15
2.2.9.3 Resistansi Kontak Berbasis Hukum Holm 17
2.2.9.4 Variansi Resistansi Kontak 17
2.2.10 Hukum Joule dan Distribusi Arus 18
2.2.11 Distribusi Arus Antar N *Brush* Paralel 18
2.2.11.1 Dasar Hukum Kirchhoff 18
2.2.11.2 Definisi Ketidakseimbangan Arus (*Current Imbalance*) 19
2.2.12 Rugi Daya Joule dan Rugi Bocor Isolasi 20
2.2.12.1 Rugi Daya Joule per *Brush* 20
2.2.12.2 Rugi Daya Bocor Isolasi 20
2.2.12.3 Rugi Gesekan 21
2.2.13 Perpindahan Panas Konveksi Paksa 21
2.2.14 Keseimbangan Termal *Steady-State* 22
2.2.15 Solusi untuk Temperatur *Brush* 22
2.2.16 Estimasi Koefisien Konveksi h 22
2.3 Pengertian *Particle Swarm Optimization* 23
2.3.1 Aplikasi PSO pada Optimasi Sistem Pembangkit 23
2.3.2 Keunggulan dan Kelemahan PSO 24
2.3.3 Aplikasi PSO dalam Teknik Mesin dan Kelistrikan 24
2.3.4 Langkah-langkah Umum PSO 24
2.3.5 Persamaan *Update Velocity* dan *Position* 25
2.3.6 Ruang Pencarian (*Search Space*) 26
2.3.7 Fungsi Tujuan (*Objective Function*) 26
2.3.8 Parameter PSO dan Justifikasi Pemilihan 27
2.3.9 Alur *Flowchart* Algoritma PSO dan Turunan Persamaan Matematisnya 27
2.3.9.1 Diagram Alur Algoritma PSO 28
2.3.9.2 Persamaan *Update* Kecepatan: Tiga Komponen 30
2.3.9.3 Kondisi Khusus pada Iterasi Pertama (t = 1) 32
2.3.9.4 Persamaan *Update* Posisi dan *Boundary Handling* 32
2.3.9.5 Fungsi Objektif (*Fitness Function*) Multi-Objektif Terbobot 33
2.3.9.6 Parameter Algoritma PSO dan Pemilihan *Constriction Coefficient* 34
2.3.9.7 Kriteria Konvergensi PSO 34

2.3.9.8 Keterkaitan dengan Bab III dan Implementasi Numerik 35
2.4 Kerangka Konseptual Penelitian 36

BAB III METODE PENELITIAN 37
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian 37
3.2 Metode Penelitian 38
3.2.1 Fase I Pengumpulan Data, Studi Literasi, dan RCFA 40
3.2.2 Fase II Pemodelan Termal-Elektrik dan Kalibrasi 41
3.2.3 Fase III Validasi Model 41
3.2.4 Fase IV Optimasi PSO 41
3.2.5 Fase V Analisis Hasil dan Rekomendasi 41
3.3 Alat dan Bahan yang Digunakan Selama Penelitian 42
3.3.1 Spesifikasi Peralatan Utama PLTA Tulungagung 42
3.3.1.1 Generator 42
3.3.1.2 *Exciter* 42
3.3.1.3 *Brush* 43
3.3.1.4 *Slip Ring* 43
3.3.2 Peralatan yang Dibutuhkan saat Pengukuran Tekanan dan Suhu *Brush* 44
3.4 Pengumpulan Data 45
3.4.1 *Historical* Pengukuran *Temperature Carbon Brush* 45
3.4.2 Perbandingan Beban dan Temperatur *Brush* 47
3.4.3 Hasil Analisa Pengukuran Menggunakan *Software* 47
3.4.4 Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi 48
3.4.5 Ringkasan Data Teknis Parameter dan Operasional 48
3.5 Konsultasi 50
3.6 Model Fisis Temperatur *Carbon Brush* (9 Langkah) 50
3.6.1 Langkah 1: Kinematik dan Geometri *Carbon Brush* 50
3.6.2 Langkah 2: Koreksi Kekasaran Permukaan (Ra) 51
3.6.3 Langkah 3: Koreksi Ketidakbundaran *Slip Ring* (R) 52
3.6.4 Langkah 4: Konversi Tekanan Pegas ke Gaya Kontak 52
3.6.5 Langkah 5: Resistansi Kontak Hukum Holm 52
3.6.6 Langkah 6: Variansi Resistansi dan Distribusi Arus 53
3.6.7 Langkah 7: Tiga Komponen Rugi Daya 53
3.6.8 Langkah 8: Keseimbangan Termal *Steady-State* (Output Utama) 54
3.6.9 Langkah 9: Evaluasi Status dan *Threshold* 54
3.7 Kalibrasi Koefisien Konveksi h 55
3.7.1 Metode Inversi Persamaan Keseimbangan Termal 55
3.7.2 Prosedur Kalibrasi Tri-Parameter 55

3.8 Validasi Model 56
3.8.1 Data Validasi 56
3.9 Implementasi *Particle Swarm Optimization* (PSO) 57
3.9.1 Ruang Pencarian (*Search Space*) 57
3.9.2 Fungsi *Fitness* (*Objective Function*) 58
3.9.3 Parameter Algoritma PSO 59
3.9.4 Inisialisasi Partikel 60
3.9.5 *Update* Kecepatan dan Posisi 60
3.9.6 Algoritma PSO 7 Langkah Eksekusi 60
3.10 Desain Sistem Analitik Berbasis Web 62
3.10.1 Konsep Sistem Analitik 63
3.10.2 Arsitektur Sistem 63
3.11 Desain Modul Sistem 64
3.11.1 *Input Module* 64
3.11.2 *Calculation Engine* 64
3.11.3 *Optimization Module* (PSO) 65
3.11.4 *Output and Visualization Module* 65
3.11.5 Implementasi Teknologi 65
3.11.6 Keunggulan Sistem 65

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN **67**
4.1 Hasil Pemodelan Termal-Elektrik 67
4.1.1 Hasil Kalkulasi Model Fisis *Step-by-Step* 67
4.1.2 Komposisi Rugi Daya 71
4.1.3 Perbandingan Kondisi N=22 dan N=24 71
4.2 Hasil Kalibrasi dan Validasi Model 72
4.3 Hasil Optimasi *Particle Swarm Optimization* (PSO) 74
4.3.1 Riwayat Konvergensi *gBest J* 74
4.3.2 Solusi Optimal dan Implikasinya 76
4.4 Analisis Sensitivitas Ra dan Rq (Skenario Degradasi) 79
4.4.1 Sensitivitas terhadap Kekasaran Permukaan Ra 79
4.4.2 Sensitivitas terhadap Ketidakbundaran R 80
4.5 Verifikasi Konsistensi Antar Platform 80
4.6 Pembahasan dan Implikasi Praktis 82
4.6.1 Interpretasi Fisis Solusi Optimal 82
4.6.2 Rekomendasi Operasional kepada PLTA Tulungagung 83
4.7 Keterbatasan Penelitian 84

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN **86**
5.1 Kesimpulan 86
5.2 Saran 87

5.2.1 Saran Implementasi untuk PLTA Tulungagung 87
5.2.2 Saran untuk Penelitian Lanjutan 88

DAFTAR PUSTAKA **90**

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Peran Tiga Komponen *Update* Kecepatan PSO 32
Tabel 2.2 Pemetaan Persamaan PSO pada Subbab 2.2.8 ke Implementasi Bab III 35
Tabel 3.1 Parameter Input Model Fisis PLTA Tulungagung 48
Tabel 3.2 Evaluasi Status Kondisi Operasi Eksisting (N=22) 55
Tabel 3.3 Parameter Kalibrasi Model Fisis 55
Tabel 3.4 Hasil Validasi Model Fisis terhadap Data Lapangan 56
Tabel 3.5 Ruang Pencarian PSO 57
Tabel 3.6 Parameter Algoritma PSO 59
Tabel 3.7 Contoh Inisialisasi 3 Partikel Pertama (t=0, *seed*=42) 60
Tabel 3.8 Rencana Waktu Pelaksanaan Penelitian 65
Tabel 4.1 Hasil Kalkulasi Model Fisis 9 Langkah Kondisi Kalibrasi (N=22) 67
Tabel 4.2 Komposisi Rugi Daya per *Brush* (N=22, Kondisi Kalibrasi) 71
Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Model N=22 vs N=24 71
Tabel 4.4 Validasi Model terhadap Data Lapangan FLIR 72
Tabel 4.5 Riwayat Konvergensi *gBest* pada Iterasi Kunci 75
Tabel 4.6 Perbandingan Parameter Eksisting Lama vs Baru vs Optimal 77
Tabel 4.7 Sensitivitas *T brush* terhadap Variasi Kekasaran Ra 79
Tabel 4.8 Sensitivitas R_I%, dan *T brush* terhadap Variasi R_a 80
Tabel 4.9 Verifikasi Konsistensi Nilai Numerik Antar Platform 81
Tabel 4.10 Rekomendasi Aksi Operasional kepada Tim PLTA Tulungagung 83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 *Milestone* Tahapan Penanganan *Overheating Carbon Brush* PLTA Tulungagung 2
Gambar 1.2 *Root Cause Failure Analysis* 3
Gambar 2.1 Skema Teknik Sistem Eksitasi PLTA Tulungagung 9
Gambar 2.2 Pengukuran Luasan *Carbon Brush* 11
Gambar 2.3 Hubungan Antarvariabel 36
Gambar 3.1 PLTA Tulungagung 38
Gambar 3.2 Diagram Alur Metode Penelitian 40
Gambar 3.3 *Nameplate Brush Exciter* PLTA Tulungagung 43
Gambar 3.4 *Nameplate Slip Ring* PLTA Tulungagung 43
Gambar 3.5 *Drawing* Konstruksi *Slip Ring* 44
Gambar 3.6 Laporan Bulanan Pemeliharaan *Predictive* 2023 45
Gambar 3.7 Laporan Bulanan Pemeliharaan *Predictive* 2024 46
Gambar 3.8 Laporan Bulanan Pemeliharaan *Predictive* 2025 46
Gambar 3.9 Standar Ketentuan *Thermography* 46
Gambar 3.10 Perbandingan Suhu dan Daya Generator Unit 2 Tahun 2023 2025 47
Gambar 3.11 Perbandingan Suhu dan Daya Generator Unit 1 Tahun 2023 2025 47
Gambar 3.12 Hasil Analisa *Software FLIR Tools+* 48
Gambar 3.13 *Flowchart* PSO 62
Gambar 3.14 Diagram Arsitektur Sistem 64
Gambar 4.1 *Software* Optimasi pada Menu *Calculate* 69
Gambar 4.2 *Dashboard* Sistem Optimasi *Carbon Brush* (SOPTI) 70
Gambar 4.3 Perbandingan Temperatur Aktual vs Prediksi 73
Gambar 4.4 Grafik Kestabilan Nilai *gBest J* selama Eksekusi PSO 76
Gambar 4.5 Kurva Konvergensi *gBest* pada Aplikasi SOPTI 76
Gambar 4.6 Output Program Sistem Optimasi (SOPTI) 78
Gambar 4.7 Rekomendasi Output Program Sistem Optimasi (SOPTI) 83