BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dijadwalkan pada bulan Oktober 2025 dengan mengambil lokasi di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Brantas, khususnya pada unit PLTA Tulungagung, Jawa Timur. Pemilihan lokasi didasarkan pada keberadaan sistem eksitasi generator berkombinasi carbon brush dan slip ring yang menjadi objek inti studi ini. Di samping itu, pembangkit ini menyediakan rekam jejak historis yang memadai mengenai kasus overheating pada carbon brush, hasil pengukuran temperatur, serta nilai resistansi isolasi. Sebagai informasi, PLTA Tulungagung mengoperasikan dua unit generator dengan kapasitas terpasang total mencapai 35,72 MW (2 × 18 MW). Berikut adalah hasil perbaikan potongan teks Anda agar sesuai dengan kaidah bahasa Indonesia yang baik dan benar (EYD/PUEBI). Perbaikan ini berfokus pada kelengkapan kalimat yang menggantung, penulisan istilah asing menjadi huruf miring (*italic*), serta penataan struktur kalimat agar lebih formal. Adapun data penunjang riset dihimpun melalui catatan perawatan prediktif (*predictive maintenance*), observasi langsung di lapangan, pengujian termografi untuk pemetaan suhu, serta pengukuran nilai tahanan isolasi.



Gambar 3.1 PLTA Tulungagung

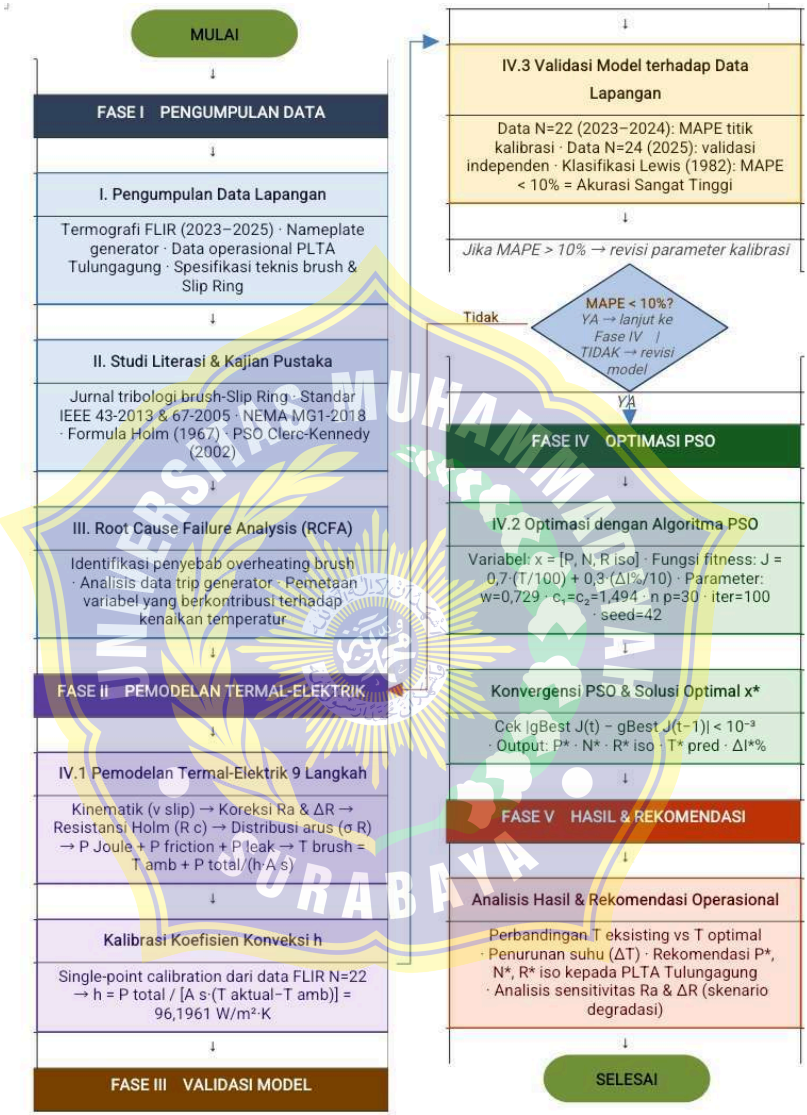
3.2 Metode Penelitian

Riset Berikut adalah hasil perbaikan teks Anda agar sesuai dengan kaidah bahasa Indonesia yang baik dan benar (EYD/PUEBI). Perbaikan ini berfokus pada kelengkapan kalimat yang menggantung, pemformatan istilah asing menjadi huruf miring (*italic*), serta penulisan tanda baca yang tepat.

Riset pada sistem eksitasi generator PLTA Tulungagung ini dirancang sebagai studi observasional-komputasional dengan pendekatan kuantitatif melalui metode studi kasus. Peneliti tidak melakukan manipulasi eksperimental karena unit harus beroperasi secara stabil demi kebutuhan komersial. Sebagai gantinya, data diperoleh dari spesifikasi teknis *nameplate* dan pengukuran lapangan periodik menggunakan termografi FLIR. (2023–2025). Alur analisis dalam studi ini mencakup tiga tahapan mendasar, yaitu:

1. Formulasi persamaan prediksi suhu dan ketidakseimbangan arus melalui pemodelan termal-elektrik berbasis hukum fisika.
2. Pencarian kombinasi parameter operasional optimal demi meminimalkan suhu serta ketidakseimbangan arus menggunakan algoritma metaheuristik *Particle Swarm Optimization* (PSO).
3. Verifikasi dan validasi hasil optimasi terhadap data operasional aktual di PLTA Tulungagung dalam kurun waktu tiga tahun.

Untuk mempermudah proses metodelogi penelitian maka dapat dilihat melalui Gambar 3.2 Diagram Alur Metode Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alur Metode Penelitian

3.2.1 Fase I – Pengumpulan Data, Studi Literasi, dan RCFA

Fase I terdiri dari tiga kegiatan paralel yang dilaksanakan pada tahap awal penelitian. Pertama, pengumpulan data lapangan dilakukan melalui pengukuran termografi FLIR secara periodik pada brush dan Slip Ring generator selama periode 2023–2025, dokumentasi data nameplate dan spesifikasi teknis generator, serta pencatatan data operasional meliputi arus eksitasi, tegangan, putaran, dan kondisi brush. Kedua, studi literasi dilakukan terhadap jurnal-jurnal tribologi brush-Slip Ring, standar internasional IEEE 43-2013 (resistansi isolasi), IEEE 67-2005 (ketidakseimbangan arus), NEMA MG1-2018 (temperatur operasional), serta literatur fundamental tentang teori kontak Holm (1967) dan algoritma PSO Clerc-Kennedy (2002). Ketiga, Root Cause Failure Analysis (RCFA) dilakukan untuk mengidentifikasi dan memetakan seluruh faktor yang berkontribusi terhadap kenaikan temperatur brush, sebagai dasar penetapan variabel model fisis.

3.2.2 Fase II – Pemodelan Termal-Elektrik dan Kalibrasi

Fase II membangun model fisis temperatur brush yang terdiri dari sembilan langkah kalkulasi berurutan berdasarkan prinsip fisika fundamental: kinematika brush-Slip Ring, koreksi kondisi permukaan (kekasaran Ra dan ketidakbundaran ΔR), resistansi kontak Holm, distribusi arus, tiga komponen rugi daya (Joule, gesek, bocor isolasi), dan keseimbangan termal steady-state Newton. Kalibrasi koefisien konveksi paksa h dilakukan dengan metode single-point calibration menggunakan data FLIR pada kondisi N=22 brush, menghasilkan h = 96,1961 W/m²·K. Detail model fisis dijabarkan pada Subbab 3.6.

3.2.3 Fase III – Validasi Model

Validasi model dilakukan menggunakan titik operasi

independen yang tidak digunakan dalam proses kalibrasi, yaitu data pengukuran FLIR pada kondisi N=24 brush (periode 2025). Model dinyatakan valid jika nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) terhadap kedua titik data berada di bawah 10%, sesuai klasifikasi akurasi sangat tinggi menurut Lewis (1982). Model yang tidak memenuhi kriteria ini dikembalikan ke Fase II untuk revisi parameter kalibrasi.

3.2.4 Fase IV – Optimasi PSO

Setelah model fisis divalidasi, optimasi parameter dilakukan menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) dengan formulasi Clerc-Kennedy (2002). PSO mencari kombinasi tiga variabel keputusan $x = [P, N, R\ iso]$ yang meminimalkan fungsi fitness multi-objektif $J = 0{,}7 \cdot (T\ pred/100) + 0{,}3 \cdot (\Delta I\%/10)$, pada ruang pencarian $P \in [2{,}5; 3{,}0]$ kgf/cm², $N \in [20; 24]$ (integer), dan $R\ iso \in [0{,}2; 100]$ MΩ. Detail implementasi PSO dijabarkan pada Subbab 3.9.

3.2.5 Fase V – Analisis Hasil dan Rekomendasi

Fase terakhir menganalisis hasil optimasi PSO secara kuantitatif, membandingkan parameter dan temperatur brush pada kondisi eksisting dengan kondisi optimal yang direkomendasikan. Analisis sensitivitas terhadap variasi kondisi permukaan Slip Ring (Ra dan ΔR) dilakukan sebagai skenario degradasi untuk menentukan jadwal perawatan preventif. Seluruh hasil disajikan dalam Bab IV beserta rekomendasi operasional yang dapat diimplementasikan langsung oleh tim pemeliharaan PLTA Tulungagung.

3.3 Alat dan Bahan yang Digunakan Selama Penelitian

3.3.1 Spesifikasi Peralatan Utama PLTA Tulungagung

Unit pembangkit listrik tenaga air Tulungagung terdiri dari beberapa peralatan utama untuk menghasilkan listrik antara lain.

3.3.1.1 Generator

Berikut ini adalah data spesifikasi generator di PLTA Tulungagung

G E N E R A T O R

Pabrik	:	E L I N - AUSTRIA
Type	:	S S V 330 / 16 - 140
Standart	:	S. 1
Nomor serie	:	1 6 5 9. 06
D a y a	:	20.000 kVA
Putaran	:	375 Rpm
Putaran Maksimum	:	735 Rpm
A r u s	:	1050 A
Klas isolasi	:	F
Frekuensi	:	50 HZ
Faktor kerja (Cos Q)	:	0 , 9
Tahun pembuatan	:	1 9 9 2
Tahun Operasi	:	1 9 9 3

Dibawah ini Gambar 3.3 Kondisi Generator PLTA Tulungagung



Gambar 3.3 Kondisi Generator PLTA Tulungagung

3.3.1.2 Exciter

Berikut ini adalah data spesifikasi exciter di PLTA Tulungagung

EXCITATION QUIPMENT

Pabrik	: S I E M E N S
Type	: -
Nomor panel	: 1 + AC 07
Tegangan	: 85 V
Arus primare	: 832 A
Frekuensi	: 50 HZ
Out put	: -
Excitation Voltage	: -

3.3.1.3 Brush

Berikut adalah data *carbon brush* yang digunakan pada sistem eksitasi PLTA Tulungagung

Brush holders, Carbon Brushes, Sliprings - Wear Limits:

EXCITATION CURRENT TRANSMISSION:

brush holders:

number	10
type	Kollektra DRDX 3225-25
factory Weiz stock-no.	0 967 695

carbon brushes:

number	20
type	Steeg DRDX 3225-E60
factory Weiz stock-no.	0 979 335
initial dimensions	32 x 25 x 40 mm
minimum dimensions	32 x 25 x 20 mm

Ssy 330/16-140 | AG-PT6/14.03.1992

Gambar 3.4 Nameplate Brush Exciter PLTA Tulungagung

Dari data di atas diketahui bahwa jumlah beras terdapat 20 buah

3.3.1.4 Slip Ring

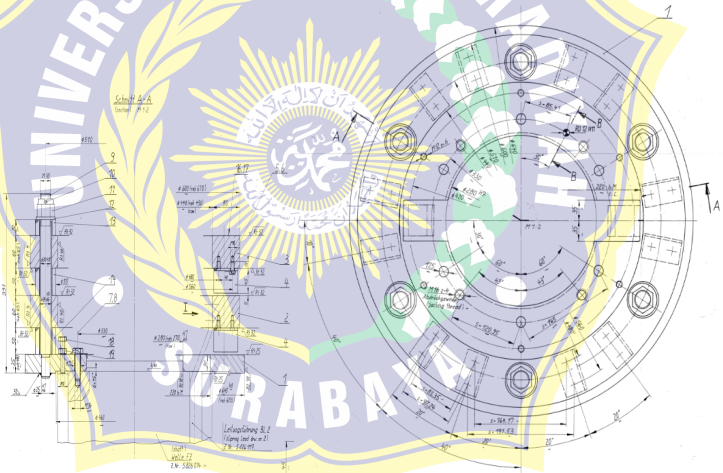
Berikut ini adalah data *slip ring* pada PLTA Tulungagung spesifikasi teknis eksisting



Gambar 3.5 Nameplate Slip Ring dan Kondisi Slip Ring pada PLTA Tulungagung

Komponen slip ring pada generator PLTA Tulungagung

memanfaatkan material baja (steel) berdasarkan dokumen spesifikasi teknisnya. Mengacu pada data nameplate di Gambar 3.5, ukuran diameter nominal awal komponen ini dirancang sebesar 600 mm, dengan batas aus kritis yang diizinkan hingga 590 mm. Selisih dimensi ini menegaskan adanya reduksi ketebalan akibat friksi mekanis yang berkelanjutan dengan carbon brush. Jika dikonversi ke dalam rumus keliling lingkaran, panjang keliling slip ring menyusut dari nilai awal 1,885 meter menjadi 1,854 meter pada batas limitnya. Penyusutan geometris tersebut berisiko memperburuk stabilitas antarmuka kontak antara carbon brush dan permukaan slip ring, khususnya yang berkaitan dengan hambatan elektrik (resistansi kontak) serta pemerataan tekanan pegas. Adapun detail rancangan teknis dari komponen ini dipaparkan pada gambar drawing konstruksi berikut.



Gambar 3.6 Drawing Konstruksi Slip Ring

Slip Rings yang dibuat dari baja dipasang terisolasi di ujung atas poros generator. Pada setiap Slip Ring dipasang 12 buah bilah kipas yang terbuat dari bahan resin sintetis. Mereka mengedarkan udara pendingin di area Slip Ring, bilah kipas menarik udara melalui screen pelindung dan mendinginkan Slip Rings dan carbon brush, menarik debu karbon dan ditiupkan melalui filter lagi kembali ke power house. Dari Slip

Rings arus eksitasi diarahkan melalui line busbar ke anker rotor dan selanjutnya ke belitan kutub

3.3.2 Peralatan yang Dibutuhkan saat Pengukuran Tekanan dan Suhu Brush

a. **FLIR (infrared visual thermo kamera)** Digunakan sebagai pengukur suhu pada peralatan untama dan alat bantu sebagai input data kondisi Kesehatan pembangkit yang rutin dilakukan inspeksi oleh bagian CBM, *Condition Base Maintenance*.

b. **Holder constant spring** merupakan tipe yang kini direkomendasikan dalam sistem eksitasi generator karena memiliki keunggulan pada kestabilan gaya tekan terhadap *carbon brush*.

c. **(*Software* FLIR tools+) sebagai *analytic Temperature*** Untuk melakukan Analisa hasil *temperature* pada suatu alat yang diukur menggunakan FLIR

d. **Magger** Megger (*Megohmmeter*), yaitu alat ukur tahanan isolasi listrik

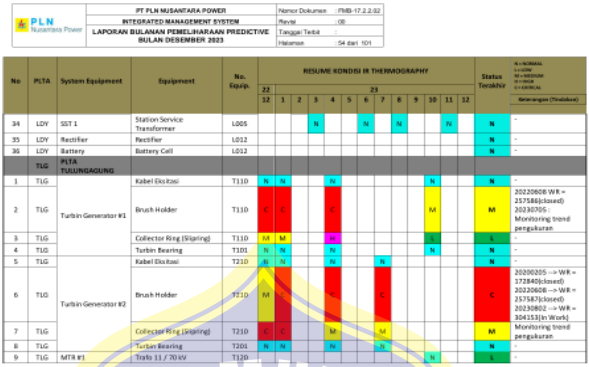
e. **Fluke meter Thermo Gun** Penggunaan thermos gun merupakan preventive Meassurement dikarenakan tidak setiap bulan team CBM datang untuk mengukur menggunakan FLIR temperature tools.

3.4 Pengumpulan Data

Untuk menganalisa penyebab terjadinya overheating pada carbon brushgenerator dibutuhkan pengumpulan data data historical peralatan yang berhubungan secara langsung antara lain:

3.4.1 Historical Pengukuran Temperature Carbon Brush

Di saat dilakukan pengukuran temperatur brush dari tahun 2023 hingga tahun 2025 kondisi temperatur beras exciter pada Slip Ring mengalami kenaikan berikut adalah data hasil dari pengukuran



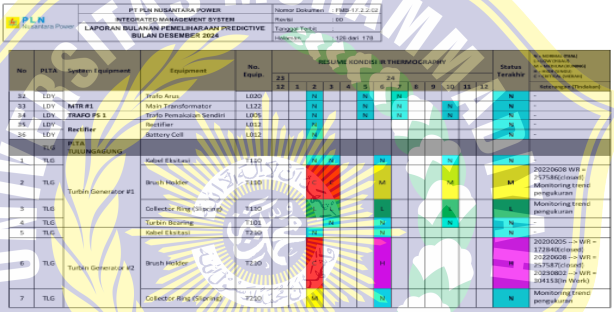
PT PLN NUSANTARA POWER
INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM
LAPORAN BULANAN PEMELIHARAAN PREDICTIVE
BULAN DESEMBER 2023

Nomor Dokumen : FMB-17.2.2.02
Revisi : 00
Tanggal Terbit :
Halaman : 54 dari 101

RESUME KONDISI IR THERMOGRAPHY

No	PLTA	System Equipment	Equipment	No. Equip.	22	23											Status Terakhir	Keterangan (Tindakan)
					12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
34	LDY	SST 1	Station Service Transformer	L005				N			N		N			N		N	-
35	LDY	Rectifier	Rectifier	L012														N	-
36	LDY	Battery	Battery Cell	L012														N	-
	TLG	PLTA TULUNGAGUNG																	
1	TLG	Turbin Generator #1	Kabel Eksitasi	T110	N	N			N						N			N	-
2	TLG		Brush Holder	T110	C	C			H						M			M	20220608 WR = 257586(closed) 20230705 : Monitoring trend pengukuran
3	TLG		Collector Ring (Slipring)	T110	M	M			H						M			L	-
4	TLG		Turbin Bearing	T101	N	N			N						N			N	-
5	TLG	Turbin Generator #2	Kabel Eksitasi	T210	N	N			N		N							N	-
6	TLG		Brush Holder	T210	M				H		C							C	20200205 --> WR = 172840(closed) 20220608 --> WR = 257587(closed) 20230802 --> WR = 304153(In Work)
7	TLG		Collector Ring (Slipring)	T210	C	C			M		M							M	Monitoring trend pengukuran
8	TLG		Turbin Bearing	T201	N	N			N		N							N	-
9	TLG	MTR #1	Trafo 11 / 70 kV	T120											N			L	-

Gambar 3.7 Laporan Bulanan Pemeliharaan Predictive 2023



PT PLN NUSANTARA POWER
INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM
LAPORAN BULANAN PEMELIHARAAN PREDICTIVE
BULAN DESEMBER 2024

Nomor Dokumen : FMB-17.2.2.02
Revisi : 00
Tanggal Terbit :
Halaman : 126 dari 179

RESUME KONDISI IR THERMOGRAPHY

No	PLTA	System Equipment	Equipment	No. Equip.	23	24											Status Terakhir	Keterangan (Tindakan)
					12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
32	LDY		Trafo Arus	L020			N			N		N			N			N	-
33	LDY	MTR #1	Main Transformator	L122			N			N		N			N			N	-
34	LDY	TRAFO PS 1	Trafo Pemakaian Sendiri	L005			N			N		N			N			N	-
35	LDY	Rectifier	Rectifier	L012			N											N	-
36	LDY		Battery Cell	L012			N											N	-
	TLG	PLTA TULUNGAGUNG																	
1	TLG	Turbin Generator #1	Kabel Eksitasi	T110			N	N			N				N			N	-
2	TLG		Brush Holder	T110							M				M			M	20220608 WR = 257586(closed) Monitoring trend pengukuran
3	TLG		Collector Ring (Slipring)	T110							L				L			L	Monitoring trend pengukuran
4	TLG		Turbin Bearing	T101				M			N				N			N	-
5	TLG	Turbin Generator #2	Kabel Eksitasi	T210			N				N							N	-
6	TLG		Brush Holder	T210							H							H	20200205 --> WR = 172840(closed) 20220608 --> WR = 257587(closed) 20230802 --> WR = 304153(In Work)
7	TLG		Collector Ring (Slipring)	T210				M			N							N	Monitoring trend pengukuran

Gambar 3.8 Laporan Bulanan Pemeliharaan Predictive 2024



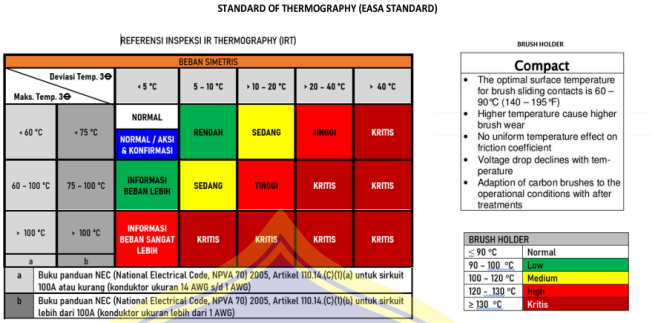
PT PLN NUSANTARA POWER
INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM
LAPORAN BULANAN PEMELIHARAAN PREDICTIVE
BULAN JULI 2025

Nomor Dokumen : FMB-17.2.2.02
Revisi : 00
Tanggal Terbit :
Halaman : 170 dari 284

RESUME KONDISI IR THERMOGRAPHY

No	PLTA	System Equipment	Equipment	No. Equip.	24					25						Status Terakhir	Keterangan (Tindakan)
					7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	
34	LDY	TRAFO PS 1	Trafo Pemakaian Sendiri	L005	46			50			53			61			47	N	-
35	LDY	Rectifier	Rectifier	L012							45			46				N	-
36	LDY		Battery Cell	L012														N	-
		PLTA TULUNGAGUNG																	
1	TLG	Turbin Generator #1	Kabel Eksitasi	T110				54			58	57				58		N	-
2	TLG		Brush Holder	T110				115			160	130				127		H	20220608 WR = 257586(closed) Monitoring trend pengukuran
3	TLG		Collector Ring (Slipring)	T110				93			108	101				103		M	Monitoring trend pengukuran
4	TLG		Turbin Bearing	T101				43				53						N	-
5	TLG	Turbin Generator #2	Kabel Eksitasi	T210							58					57		N	-
6	TLG		Brush Holder	T210							117					146		C	20200205 --> WR = 172840(closed) 20220608 --> WR = 257587(closed) 20230802 --> WR = 304153(In Work)
7	TLG		Collector Ring (Slipring)	T210							93					99		L	Monitoring trend pengukuran
8	TLG		Turbin Bearing	T201														N	-

Gambar 3.9 Laporan Bulanan Pemeliharaan Predictive 2025

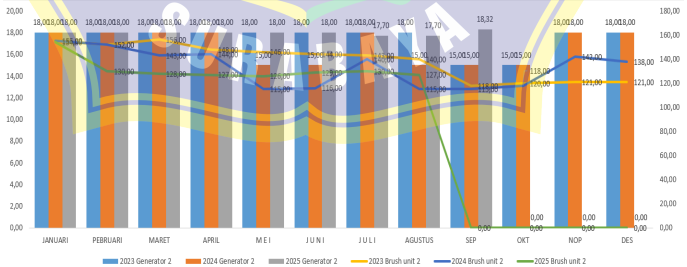


Gambar 3.10 Standar Ketentuan Thermography

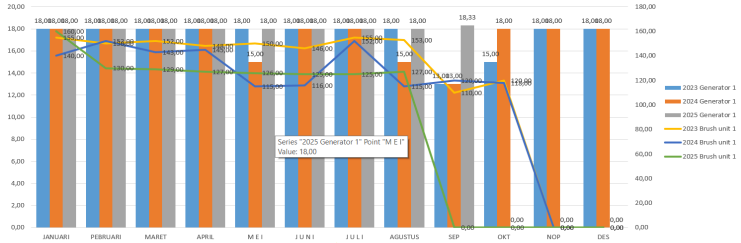
Dari data laporan pemeliharaan prediktif diatas diketahui terjadi *overheating* pada *Carbon brush* Unit Generator 1 dan Unit Generator 2 sejak tahun 2023 sampai tahun 2025 .dengan nilai maksimal temperatur unit 1 160°C dan unit 2 146°C. hal ini berdampak pada *lifetime* peralatan pembangkit dan berpotensi terjadinya gangguan internal yang dapat mengakibatkan *trip*.

3.4.2 Perbandingan Beban dan Temperatur Brush

Berdasarkan pengukuran rutin diatas maka dikombinasikan antara pengukuran local danpengukuran yang dilakukan oleh *team* CBM maka didapatkan hasil sebagaiberikut.



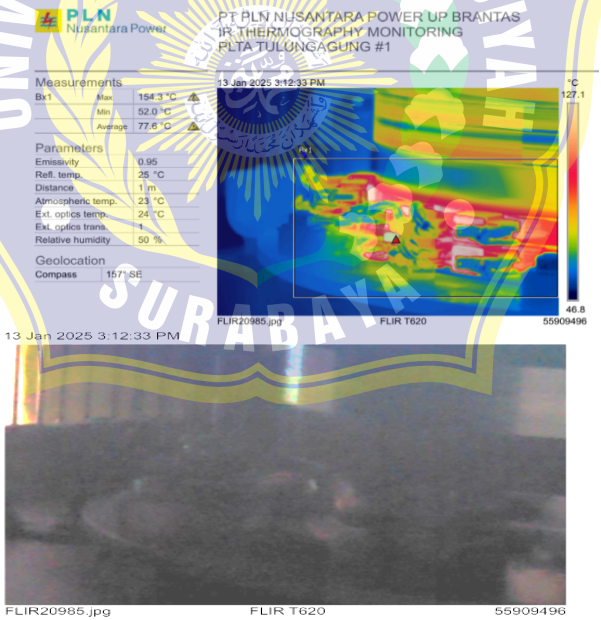
Gambar 3.11 Perbandingan Suhu dan Daya Generator Unit 2 Tahun 2023–2025



Gambar 3.12 Perbandingan Suhu dan Daya Generator Unit 1 Tahun 2023–2025

Dari kedua Grafik diatas diperoleh dapat disimpulkan dengan upayah penggantian karbon brush ditahun 2024 dan penambahan titik Brush di tahun 2025 suhu pada brush exciter dapat menurun namun penurunanya masih dalam kondisi kritikal yaitu temperatur unit 1 160°C dan unit 2 146°C

3.4.3 Hasil Analisa Pengukuran Menggunakan Software



Gambar 3.13 Hasil Analisa Software FLIR Tools+

3.4.4 Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi

Saat dilakukan pengukuran tahanan isolasi dibulan September 2025 didapatkan hasil 0,2 MΩ di unit Generator 2 dan 0,3 MΩ di unit generator ,Dimana hasil ini dibawah batasam minimum tahanan isolasi standart yang di izinkan (R) = 50 MΩ.

Tabel 3.1 Tahanan Isolasi (mΩ) Slip Ring Unit

Tahanan Isolasi (MΩ) Slip Ring Unit 2			
Posisi Slip Ring	30 Agustus 2022 SEBELUM GI	30 Agustus 2022 SESUDAH GI	Agustus 2025
POSITIF - GND	2.15 MΩ	39.5 GΩ	0.3 MΩ
NEGATIF - GND	1.92 MΩ	53.5 GΩ	0.2 MΩ
	-Terjadi Gangguan Over Heating - Unit ForceOutage	Setelah dilakukan GI	Uji Pengukuran di 2025

3.4.5 Ringkasan Data Teknis Parameter dan Operasional

Untuk memudahkan proses matematis maka Seluruh data teknis yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari dokumentasi teknis PLTA Tulungagung, datasheet material brush Mersen Natural Graphite, dan hasil pengukuran lapangan selama periode 2023–2025. Tabel 3.2 merangkum seluruh parameter input model fisis yang digunakan secara konsisten pada Kalkulator Model Fisis dan Simulasi PSO

Tabel 3.2 Parameter Input Model Fisis PLTA Tulungagung

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan	Sumber / Keterangan	Pers.
Tekanan pegas	P	2,9	kgf/cm²	Kondisi eksisting 2023–2025, Excel R-sheet	**(8)**
Jumlah brush	N	22 / 24	pcs	22 brush (2023–2024); 24 brush (2025)	**(15)**
Tahanan isolasi	R iso	0,2	MΩ	Hasil uji megger; di bawah standar IEEE 43-2013 (≥100 MΩ)	**(26)**
Tegangan eksitasi	V	85	V DC	Tegangan kerja eksitasi generator	
Arus eksitasi total	I total	832	A	Arus kerja kondisi beban penuh	**(15)**
Diameter Slip Ring	D sr	590	mm	Spesifikasi teknis generator	(1)
Lebar brush (keliling)	W b	25	mm	Standar Mersen Natural Graphite	(3)
Tinggi brush	H b	40	mm	Dimensi brush aktual	**(40)**
Jarak antar holder	S	50	mm	Clearance minimum antar brush	(39)
Putaran generator	n	375	rpm	Putaran sinkron 50 Hz, 8 kutub	(1)
Kekasaran permukaan	Ra	0,8	µm	Referensi standar ISO 1302; kondisi machining baru	(5)
Ketidakbundaran Slip Ring	ΔR	0,05	mm	Referensi standar ISO 1101; kondisi machining baru	(7)
Resistivitas brush	ρ	$2{,}5\times10^{-5}$	Ω·m	Mersen Natural Graphite datasheet	**(12)**
Kekerasan brush	H	1×10^{9}	Pa	[10]	**(12)**
Koef. gesek baseline	μ_0	0,003		Natural graphite self-lubrication; Bhushan	(5)

				2013	
A-spot baseline	n a,0	30		[14], rentang 10–100 untuk graphite	(12)
Suhu ambient	T amb	35	°C	Suhu ruang generator dalam gedung	(33)
Luas disipasi termal	A s	0,003	m^2	Luas permukaan konveksi efektif per brush	(33)
Koef. konveksi (kalibrasi)	h	96,1961	$W/m^2 \cdot K$	Hasil kalibrasi tri-parameter DE; lihat Subbab 3.7	(33)

3.5 Konsultasi

Konsultasi dengan dosen pembimbing mengenai tujuan monitoring yang akan dilakukan, membahas permodelan yang ingin di buat, menentukan cara mengambil data hasil monitoring untuk selanjutnya dijadikan hasil penelitian yang valid.

3.6 Model Fisis Temperatur Carbon Brush (9 Langkah)

Model fisis yang dikembangkan dalam penelitian ini terdiri atas sembilan langkah kalkulasi berurutan yang merepresentasikan fenomena fisika pada sistem brush-Slip Ring secara terintegrasi. Model ini mengimplementasikan teori-teori yang telah dijabarkan pada Bab II, yaitu Hukum Holm untuk resistansi kontak, Hukum Joule untuk rugi daya resistif, Hukum Coulomb-Amonton untuk rugi gesek, dan Hukum Newton untuk keseimbangan termal. Asumsi-asumsi penyederhanaan yang ditetapkan adalah: (1) sistem beroperasi dalam kondisi steady-state termal, (2) distribusi gaya kontak diasumsikan seragam dengan ketidakseragaman dimodelkan sebagai variansi statistik σ R, (3) perpindahan panas didominasi oleh konveksi paksa dari 12 bilah kipas pendingin Slip Ring, dan (4) resistivitas material dianggap konstan dalam rentang operasi normal.

3.6.1 Langkah 1: Kinematik dan Geometri Carbon Brush

Langkah pertama menghitung parameter kinematik dan geometris Slip Ring yang menjadi dasar seluruh perhitungan berikutnya. Kecepatan luncur (slip velocity) merupakan kecepatan relatif brush terhadap permukaan Slip Ring yang berputar menggunakan persamaan(1)

Untuk PLTA Tulungagung dengan D sr = 590 mm = 0,590 m dan n = 375 rpm:

$$v_{slip} = \pi \times 0{,}590 \times 375 / 60 = 11{,}585 \text{ m/s}$$

Keliling Slip Ring digunakan untuk menentukan pitch aktual dan batas geometris jumlah brushmenggunakan persamaan (2)

$$\text{pitch} = \frac{K}{N} \quad (\text{harus} \geq Wb+S = 75) \qquad = 1853{,}54 / 22 = 84{,}25 \text{ mm}$$

(harus ≥ W b + S = 75 mm) (3)

$$N_{max} = \left\lfloor \frac{K}{P_{min}} \right\rfloor \quad \lfloor 1853{,}54 / 75 \rfloor = 24 \text{ brush} \qquad (4)$$

Nilai N max = 24 menjadi batas atas ruang pencarian PSO, karena secara geometris Slip Ring hanya dapat menampung maksimal 24 brush tanpa tumpang tindih. Pitch aktual 84,25 mm > 75 mm memastikan konfigurasi N=22 maupun N=24 feasible secara geometris.

3.6.2 Langkah 2: Koreksi Kekasaran Permukaan (Ra)

Penelitian ini memperkenalkan koreksi dinamis terhadap koefisien gesek efektif (μ eff) dan jumlah a-spot aktif (n a) berdasarkan kekasaran permukaan Slip Ring aktual. Koreksi dilakukan secara linear terhadap deviasi Ra dari nilai referensi kalibrasi Ra ref = 0,8 μm (kondisi machining baru, ISO 1302), mengacu pada hubungan friction-roughness dari Bhushan (2013) untuk koefisien gesek dan model Greenwood (1966) untuk jumlah titik kontakmenggunakan persamaan (5) dan (6)

dengan nilai koefisien sensitivitas α μ = 0,15/μm dan α n = 0,10/μm. Untuk kondisi referensi Ra = 0,8 μm:

$$\mu \text{ eff} = 0{,}003 \times (1 + 0{,}15 \times (0{,}8 - 0{,}8)) = 0{,}003$$

$$n\ a = 30 \times (1 + 0{,}10 \times (0{,}8 - 0{,}8)) = 30$$

Pada kondisi referensi, nilai terkoreksi identik dengan nilai baseline, memastikan konsistensi dengan data kalibrasi. Permukaan yang lebih kasar (Ra > 0,8 µm) meningkatkan µ eff (gesek lebih besar) sekaligus n a (lebih banyak titik kontak), menciptakan trade-off antara rugi gesek dan rugi Joule.

3.6.3 Langkah 3: Koreksi Ketidakbundaran Slip Ring (ΔR)

Ketidakbundaran Slip Ring (out-of-round) menyebabkan osilasi brush yang memperburuk ketidakmerataan distribusi arus. Kontribusi ΔR terhadap variansi resistansi kontak dimodelkan secara linear mengacu pada [14] menggunakan persamaan (7)

dengan α R = 0,5/mm. Untuk kondisi referensi ΔR = 0,05 mm:

$$\sigma \text{ extra} = 0{,}5 \times 0{,}05 = 0{,}025$$

3.6.4 Langkah 4: Konversi Tekanan Pegas ke Gaya Kontak

Parameter yang diukur di lapangan adalah tekanan kontak P dalam satuan kgf/cm² menggunakan spring tester. Konversi ke satuan SI dilakukan melalui persamaan **(8)** Bab II:

dengan A b = W b × H b = 25 × 40 = 1000 mm² = $1{,}0\times10^{-3}$ m². Untuk P = 2,9 kgf/cm²:

$$P[\text{Pa}] = 2{,}9 \times 98066{,}5 = 284.392{,}85 \text{ Pa}$$

$$F = 284.392{,}85 \times 1{,}0\times10^{-3} = 284{,}39 \text{ N per brush}$$

3.6.5 Langkah 5: Resistansi Kontak – Hukum Holm

Resistansi kontak dihitung *sesuai dengan penelitihan terdahulu* [1]. yang diturunkan dari persamaan **(12)** Bab II, menggunakan n a terkoreksi dari Langkah 2:

Resistansi badan brush dihitung berdasarkan hukum Ohm untuk konduktor dengan panjang L b = 40 mm: dan dilanjutkan menggunakan persamaan **(40)**

$$R \text{ total} = R\ c + \left(\frac{\rho\ .\ L\ b}{A \text{ brush}}\right) \qquad (39)$$

Substitusi nilai untuk kondisi kalibrasi (P=2,9; N=22; Ra=0,8; ΔR=0,05):

$$R_c = (2{,}5\times10^{-5}/2)\cdot\sqrt{(\pi\times10^{9}/(30\times284{,}39))} = 7{,}585\times10^{-3}\ \Omega$$

$$R_b = 2{,}5\times10^{-5}\times0{,}040\ /\ 1{,}0\times10^{-3} = 1{,}0\times10^{-3}\ \Omega$$

$$R_{total} = 7{,}585\times10^{-3} + 1{,}0\times10^{-3} = 8{,}585\times10^{-3}\ \Omega = 8{,}585\ m\Omega$$

3.6.6 Langkah 6: Variansi Resistansi dan Distribusi Arus

Variansi resistansi kontak antar brush σ R dimodelkan menggunakan persamaan empiris yang diturunkan dari pengamatan *sesuai dengan penelitihan terdahulu* [1] dan [14]. diperluas dengan kontribusi ketidakbundaran Slip Ring dari Langkah 3 (Persamaan 36 Bab III):M enggunakan persamaan (13) Bab II:

dengan parameter kalibrasi: σ min = 0,1000, k P = 0,10, k N = 15,00, P opt = 2,75 kgf/cm². Untuk kondisi P=2,9; N=22; ΔR=0,05:

$$\sigma R = 0{,}1000 + 0{,}10\times(2{,}9-2{,}75)^2 + 15{,}00/22^2 + 0{,}025$$

$$\sigma R = 0{,}1000 + 0{,}00225 + 0{,}03100 + 0{,}025 = 0{,}15825$$

Distribusi arus antar N brush paralel dihitung dari Persamaan (19) dan (20) Bab II:

$$I_{avg} = I_{total} / N = 832 / 22 = 37{,}82\ A \text{ per brush}$$

$$I_{max} = 1 + \frac{I_{total}}{N}\times+(1 + 2\sigma R) = 37{,}82\times(1 + 2\times0{,}15825) = 49{,}79\ A \quad (19)$$

$$\Delta I\% = 4\cdot\sigma R\times100\% = 4\times0{,}15825\times100 = 63{,}30\% \quad (22)$$

3.6.7 Langkah 7: Tiga Komponen Rugi Daya

Total daya panas yang dibangkitkan per brush merupakan superposisi tiga komponen sesuai Persamaan (25) Bab II:

(a) Rugi Joule menggunakan I max (kondisi worst-case, brush dengan resistansi terendah):

$$P_{Joule} = I_{max}^2\times R_{total} \qquad \textbf{al} = 49{,}79^2\times8{,}585\times10^{-3} = 21{,}28\ W \quad \textbf{(23a)}$$

(b) Rugi gesek mekanis menggunakan μ eff terkoreksi dari

Langkah 2:

P friction = μ eff · F · v slip = 0,003 × 284,39 × 11,585 = 9,88 W (38)

(c) Rugi bocor isolasi per brush dibagi rata ke N brush:

$$P_{leak} = \left(\frac{V^2}{R_{iso}}\right) = 85^2 / (0{,}2 \times 10^6) = 0{,}03613\ W \quad (26)$$

$$P_{leak} = \left(\frac{P_{leak,total}}{N}\right) = 0{,}03613 / 22 = 1{,}642 \times 10^{-3}\ W \quad (29)$$

Total daya panas per brush:

$$P_{total} = P_{Joule} + P_{friction} + P_{leak,per} = 21{,}28 + 9{,}88 + 0{,}00164 = 31{,}16\ W \quad (25)$$

Komposisi daya menunjukkan bahwa P Joule dominan (68,3%), diikuti P friction (31,7%), dan P leak sangat kecil (0,005%) pada kondisi R iso = 0,2 MΩ. Namun P leak menjadi signifikan hanya jika R iso lebih rendah lagi, dan R iso yang rendah juga mempengaruhi PSO dalam mencari R iso optimal.

3.6.8 Langkah 8: Keseimbangan Termal Steady-State (Output Utama)

Pada kondisi steady-state, P total per brush sama dengan daya yang dilepas ke lingkungan melalui konveksi paksa dari kipas pendingin Slip Ring. Berdasarkan Hukum Newton tentang pendinginan (Persamaan 24 Bab II):

$$P_{dissipated,k} = h \times A_s \times (T_{brush,k} - T_{amb}) \quad (32)$$

Dengan menyamakan P total = P dissipated dan menyelesaikan untuk T brush, diperoleh persamaan prediksi temperatur brush (Persamaan 25 Bab II):

$$T_{brush} = T_{amb} + \frac{P_{total}}{h \times A_s} \quad (33)$$

Substitusi nilai dengan h = 96,1961 W/m²·K (hasil kalibrasi,

lihat Subbab 3.7):

T brush = 35 + 31,16 / (96,1961 × 0,003) = 35 + 107,99 = 142,99°C

Nilai 142,99°C untuk kondisi kalibrasi (N=22, P=2,9, R iso=0,2) dibandingkan dengan T aktual = 145,89°C, menghasilkan APE = 1,99%. Nilai ini masuk dalam kategori akurasi sangat tinggi *sesuai dengan penelitihan terdahulu* [12].

3.6.9 Langkah 9: Evaluasi Status dan Threshold

Tabel 3.3 Temperatur brush hasil prediksi dievaluasi terhadap tiga threshold standar:

Tabel 3.3 Evaluasi Status Kondisi Operasi Eksisting (N=22)

Status	Threshold	Standar	Hasil N=22
NORMAL	T brush < 100°C	NEMA MG1 -2018	CRITICAL T = 142,99°C
WARNING	100 ≤ T brush < 130°C	NEMA MG1 -2018	(di atas warning)
CRITICAL	T brush ≥ 130°C	NEMA MG1 -2018	✓ Sesuai
ΔI% PASS	ΔI% < 10%	IEEE 67-2005	CRITICAL ΔI = 63,30%
R iso PASS	R iso ≥ 100 MΩ	IEEE 43-2013	BELOW R iso = 0,2 MΩ

3.7 Kalibrasi Koefisien Konveksi h

Koefisien konveksi paksa h tidak dapat ditentukan secara analitis untuk geometri kompleks brush-Slip Ring dengan 12 bilah kipas yang terintegrasi pada rotor. Oleh karena itu, h dikalibrasi menggunakan metode single-point calibration yang lazim pada studi instalasi pembangkit komersial.

3.7.1 Metode Inversi Persamaan Keseimbangan Termal

Dengan menginversi Persamaan 25, nilai h dapat diperoleh langsung dari data pengukuran lapangan menggunakan persamaan *(33a)*

Data yang digunakan sebagai titik kalibrasi adalah pengukuran FLIR pada kondisi N=22 brush (periode 2023–2024), dengan T aktual = 145,89°C (rata-rata 19 sampel data terfilter). P total dihitung dari model fisis (Langkah 7) pada kondisi kalibrasi identik.

3.7.2 Prosedur Kalibrasi Tri-Parameter

Karena model memiliki tiga parameter kalibrasi yang saling bergantung h (koefisien konveksi), σ min (variansi resistansi minimum), dan k N (sensitivitas paralelisasi brush) kalibrasi dilakukan menggunakan optimasi Differential Evolution (DE) yang meminimalkan jumlah kuadrat error terhadap dua titik data referensi (N=22 dan N=24). Hasil kalibrasi adalah:

Tabel 3.4 Parameter Kalibrasi Model Fisis

Parameter Kalibrasi	Simbol	Nilai	Satuan / Keterangan
Koef. konveksi paksa	h	96,1961	W/m²·K konveksi paksa dengan 12 bilah kipas
Variansi resistansi minimum	Σ min	0,1000	Variansi intrinsik brush baru
Sensitivitas paralelisasi	K N	15,00	Pengaruh jumlah brush N pada σ R
Tekanan optimum mekanis	P opt	2,75	kgf/cm² fixed dari analisis mekanik
Sensitivitas tekanan	K P	0,10	Fixed dari studi tribologi

Nilai h = 96,1961 W/m²·K lebih tinggi dari estimasi awal menggunakan korelasi *sesuai dengan penelitihan terdahulu* [11]

untuk flat plate (40–80 W/m²·K). Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh dua faktor: (1) efek centrifugal pumping akibat rotasi Slip Ring pada 375 rpm yang secara aktif mendorong aliran udara melebihi aliran natural, dan (2) 12 bilah kipas terintegrasi yang menghasilkan konveksi paksa terorganisir. Referensi Kang et al. (2012) melaporkan nilai h eksperimental untuk brush generator yang dapat mencapai 80–120 W/m²·K tergantung kecepatan putaran, konsisten dengan nilai kalibrasi yang diperoleh. Nilai 96,1961 W/m²·K masih dalam rentang fisik yang valid untuk konveksi paksa moderat (25–250 W/m²·K, *sesuai dengan penelitihan terdahulu* [11].

3.8 Validasi Model

Karena keterbatasan variabilitas parameter input pada data pengukuran lapangan PLTA Tulungagung, validasi model menggunakan strategi single-point validation: satu titik operasi digunakan untuk kalibrasi, dan satu titik operasi berbeda yang tidak digunakan dalam kalibrasi dipakai untuk validasi independen.

3.8.1 Data Validasi

Tabel 3.5 Hasil Validasi Model Fisis terhadap Data Lapangan

Skenario	Kondisi	Periode	P	N	T aktual (°C)	T prediksi (°C)	APE (%)
Kalibrasi	N=22, P=2,9, R=0,2	2023–2024	2,9	22	145,89	142,99	1,99
Validasi	N=24, P=2,9, R=0,2	2025	2,9	24	127,00	130,29	2,59
MAPE	Rata-rata 2 skenario						**2,29**

Evaluasi menggunakan klasifikasi Lewis (1982) menunjukkan bahwa model prediksi ini memiliki akurasi yang sangat tinggi dengan perolehan nilai MAPE sebesar 2,29% (di bawah limit 10%) [12]. Validitas model semakin kuat karena mampu mengikuti arah perubahan data aktual di pembangkit. Fenomena penurunan temperatur dari 145,89°C ke 127,00°C akibat penambahan jumlah

brush (dari 22 menjadi 24 buah) di lapangan, berhasil direplikasi oleh model dengan penurunan dari 142,99°C ke 130,29°C. Secara akademis, kesesuaian perilaku ini mengindikasikan bahwa permodelan yang dirancang telah merepresentasikan fenomena fisik yang sesungguhnya pada sistem eksitasi, bukan hanya sebuah kecocokan matematis belaka.

Metrik MAPE dihitung menggunakan formula standar:

$$MAPE = (1/n) \cdot \Sigma \, T\,aktual - T\,pred| \,/\, T\,aktual \times 100\%$$

$$MAPE = (1/2) \times (145{,}89-142{,}99|/145{,}89 + |127{,}00-130{,}29/127{,}00) \times 100 =$$

$$2{,}29\%$$

3.9 Implementasi Particle Swarm Optimization (PSO)

Setelah model fisis divalidasi, optimasi parameter dilakukan menggunakan algoritma PSO dengan formulasi *sesuai dengan penelitihan terdahulu* [11]. Tujuan optimasi adalah mencari kombinasi tiga variabel x = [P, N, R iso] yang meminimalkan fungsi fitness J(x), sehingga diperoleh parameter operasional dengan temperatur brush minimum dan distribusi arus paling merata secara simultan.

3.9.1 Ruang Pencarian (Search Space)

Batas pencarian ditetapkan berdasarkan pertimbangan teknis dan standar operasional:

Tabel 3.6 Ruang Pencarian PSO

Variabel	Batas Bawah	Batas Atas	Tipe	Dasar Penetapan
Tekanan brush P (kgf/cm²)	2,5	3,0	Kontinu	Spesifikasi spring holder Mersen; safety margin ±0,25 dari P opt
Jumlah brush N (pcs)	20	24	Diskrit (integer)	N max = 24 dari geometri Slip Ring (Pers. 34); N min = 20 untuk redundansi minimal
Tahanan isolasi R iso (MΩ)	0,2	100	Kontinu	0,2 MΩ = kondisi aktual (batas bawah); 100 MΩ = standar minimum IEEE 43-2013

Material brush (grade) tidak dimasukkan sebagai variabel optimasi karena penelitian ini menggunakan Natural Graphite secara konsisten sesuai kondisi operasional eksisting PLTA Tulungagung. Parameter kondisi permukaan Ra dan ΔR ditetapkan pada nilai referensi (0,8 μm dan 0,05 mm) selama proses optimasi PSO, sehingga optimasi PSO mencari parameter yang optimal pada kondisi Slip Ring dalam kondisi baik.

3.9.2 Fungsi Fitness (Objective Function)

Fitness adalah **fungsi matematika yang mengukur "seberapa baik" sebuah solusi**.

Dalam PSO, setiap partikel mewakili satu solusi kandidat. Fitness merupakan nilai numerik tunggal yang menjawab pertanyaan: **"Seberapa dekat solusi ini terhadap target yang ingin dicapai?"** Semakin **kecil nilai fitness** maka semakin **baik solusi**

Fungsi fitness yang dioptimasi PSO menggunakan formulasi linear weighted sum multi-objektif yang telah dijabarkan pada Bab II Persamaan (43) dengan:

- T_{ref} = 100°C nilai referensi normalisasi suhu (NEMA MG1-2018, batas ideal brush)
- ΔI_{ref} = 10% nilai referensi normalisasi ketidakseimbangan arus (IEEE 67-2005)
- w_1 = 0,7 bobot prioritas temperatur (faktor utama penyebab trip generator)
- w_2 = 0,3 bobot prioritas keseimbangan arus; $w_1 + w_2 = 1$

Normalisasi dengan T_{ref} dan ΔI_{ref} memastikan kedua komponen berada pada skala yang sebanding sebelum dijumlahkan. T_{pred} dan $\Delta I\%$ dihitung dari model fisis lengkap (Langkah 1–8, Subbab 3.6) untuk setiap posisi partikel x = [P, N, R iso].

3.9.3 Parameter Algoritma PSO

Parameter PSO dipilih mengikuti formulasi *sesuai dengan penelitihan terdahulu* [11]. yang menjamin konvergensi tanpa eksplosi kecepatan:

Tabel 3.7 Parameter Algoritma PSO

No	Parameter	Simbol	Nilai	Justifikasi
1	Jumlah partikel	n p	30	Cukup untuk ruang 3 dimensi; *sesuai dengan penelitihan terdahulu* [15].
2	Iterasi maksimum	n iter	100	Konvergensi tercapai pada iterasi ke-1 dalam simulasi; 100 sebagai margin keamanan
3	Inertia weight (konstan)	w	0,729	*sesuai dengan penelitihan* [11].
4	Koefisien kognitif	c_1	1,494	*sesuai dengan penelitihan* [11].
5	Koefisien sosial	c_2	1,494	Identik c_1 untuk keseimbangan antara eksplorasi personal dan sosial
6	Random seed	seed	42	Deterministik memastikan reprodusibilitas hasil sesuai standar akademik
7	Bobot fitness (T)	w_1	0,70	Temperatur sebagai faktor penyebab trip langsung (insiden 27 Sep 2022)
8	Bobot fitness (ΔI%)	w_2	0,30	Ketidakseimbangan arus sebagai faktor pendorong sekunder

3.9.4 Inisialisasi Partikel

Sebanyak n p = 30 partikel diinisialisasi secara acak dalam ruang pencarian menggunakan PRNG deterministik Mulberry32 dengan seed = 42. Posisi awal partikel ke-i dibangkitkan sebagai:

$$x_{P,i} = P_{min} + r_1 \cdot (P_{max} - P_{min})$$

$$x_{N,i} = \mathrm{ROUND}(N_{min} + r_2 \cdot (N_{max} - N_{min}))$$

$$x_{R,i} = R_{min} + r_3 \cdot (R_{max} - R_{min})$$

dengan $r_1, r_2, r_3 \sim \mathrm{Uniform}[0,1]$ dari Mulberry32(seed=42). Dimensi N dibulatkan ke integer terdekat. Kecepatan awal diinisialisasi sebagai nilai acak kecil di sekitar nol. Contoh tiga partikel pertama (t=0) dari Simulasi PSO:

Tabel 3.8 Contoh Inisialisasi 3 Partikel Pertama (t=0, seed=42)

ID	P_0	N_0	R iso,0	σ R	T pred (°C)	ΔI%	J
P01	2,687	24	73,25	0,1514	129,51	60,57	2,724
P02	2,529	23	60,19	0,1582	136,56	63,30	2,855
P03	2,916	21	18,35	0,1618	151,04	64,71	2,999

3.9.5 Update Kecepatan dan Posisi

Pada setiap iterasi t, kecepatan dan posisi partikel diperbarui menggunakan Persamaan (34) dan (35) Bab II:

Khusus untuk dimensi N yang diskrit, posisi dibulatkan setelah update:

$$x_{i,n}^{(t+1)} = \mathrm{round}\left(\mathrm{clamp}\left(x_{i,n}^{(t)} + v_{i,n}^{(t+1)}, M_{min} N_{max}\right)\right) \qquad (36)$$

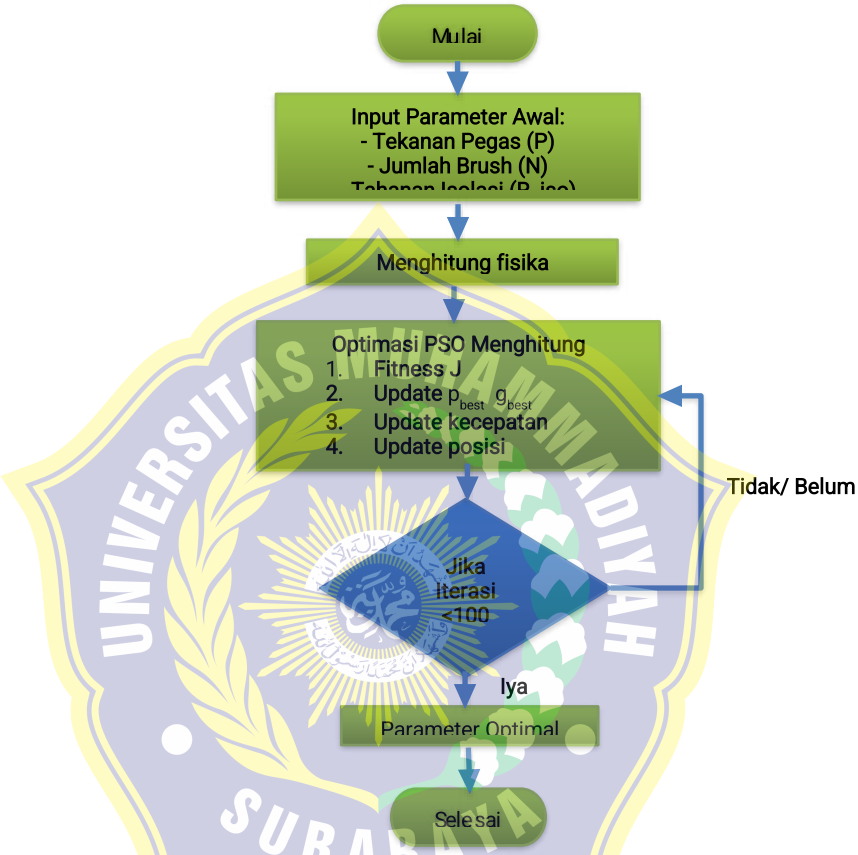
Fungsi clamp memastikan posisi partikel tidak keluar dari batas pencarian. Evaluasi fitness dilakukan setiap update posisi menggunakan model fisis lengkap (Pers. 42).

3.9.6 Algoritma PSO – 7 Langkah Eksekusi

Eksekusi PSO mengikuti 7 langkah berikut secara berurutan:

1. INISIALISASI Bangkitkan 30 partikel acak dalam search space [Tabel 3.6] menggunakan Mulberry32(seed=42). Set pBest i = x i dan hitung J(x i) untuk semua partikel.
2. EVALUASI FITNESS Hitung J(x i) = w_1·(T pred/T ref) + w_2·(ΔI%/ΔI ref) untuk setiap partikel menggunakan model fisis 9 langkah (Pers. 42).
3. UPDATE pBest Jika J(x i^new) < J(pBest i), maka pBest i = x i^new (Langkah 3 PSO).
4. UPDATE gBest Jika J(x i^new) < J(gBest), maka gBest = x i^new (Langkah 4 PSO).
5. UPDATE KECEPATAN Gunakan Persamaan (34) dengan w=0,729, c_1=c_2=1,494 dan r_1,r_2 ~ Uniform[0,1] independen.
6. UPDATE POSISI Gunakan Persamaan (35); untuk N gunakan Persamaan (36) (pembulatan + clamp).
7. CEK KONVERGENSI Jika iterasi < 100, kembali ke Langkah 2. Jika selesai, output gBest sebagai solusi optimal x* = [P*, N*, R* iso].

Sebagai upaya untuk memperjelas tahapan proses analisis dan simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini, penulis menambahkan flowchart metode Particle Swarm Optimization (PSO) untuk menggambarkan secara sistematis alur kerja optimasi mulai dari penentuan parameter awal hingga proses konvergensi hasil simulasi.Dibawah ini gambar 3.18 Flowchart PSO



Gambar 3.14 Flowchart PSO

Penjelasan Alur Flowchart Metode PSO

Flowchart metode *Particle Swarm Optimization (PSO)* pada penelitian ini menggambarkan proses berpikir yang runtut dan logis dalam mencari solusi terbaik untuk menurunkan suhu permukaan *carbon brush* pada sistem eksitasi generator PLTA Tulungagung. Proses dimulai dengan penentuan tujuan utama optimasi, yaitu menemukan kombinasi parameter yang mampu menjaga kestabilan arus

eksitasi dan meminimalkan rugi daya panas pada sistem.

Tahap selanjutnya adalah memasukkan parameter awal seperti tekanan pegas, jumlah *brush*, tahanan isolasi, Setelah semua variabel dimasukkan, dilakukan inisialisasi partikel di mana setiap partikel mewakili kemungkinan kombinasi nilai parameter yang berbeda. Dari sini, setiap partikel akan dievaluasi dengan menghitung nilai ΔI, P leak, T pred, dan *fitness (J)* untuk menilai seberapa baik kombinasi parameter tersebut bekerja.

Nilai terbaik dari masing-masing partikel disimpan sebagai *personal best (pbest)*, sementara Nilai optimum dari keseluruhan populasi dalam algoritma ini didefinisikan sebagai global best (g {best}). Melalui proses perulangan iteratif, variabel posisi dan kecepatan setiap partikel akan disesuaikan kembali berdasarkan formula standar PSO hingga mencapai titik konvergensi suatu kondisi di mana fluktuasi nilai fitness menjadi sangat insignifikan atau solusi telah mencapai kestabilan. Pada fase konklusi, hasil simulasi PSO menyajikan kombinasi parameter operasional paling optimal yang mampu mereduksi temperatur carbon brush, memperpanjang usia pakai komponen, serta memperkuat keandalan sistem eksitasi pada generator. Melalui mekanisme tersebut, PSO tidak sekadar berperan sebagai instrumen komputasi matematis, melainkan beralih fungsi sebagai sebuah metode analitis komprehensif guna memetakan interaksi fisis antara tekanan pegas, kuantitas brush, resistansi isolasi, dan karakteristik material pada sistem kelistrikan PLTA.

3.10 Desain Sistem Analitik Berbasis Web

3.10.1 Konsep Sistem Analitik

Penyebab terjadinya Panas berlebih dikarenakan beberapa faktor antara lain yaitu. jumlah brush, tekanan pada pegas holder, dan kondisi tahanan isolasi. Untuk menganalisa masing masing efek yang diberikan oleh masing masing variabel tersebut dibutuhkan sebua tools analitis yang bekerja berdasarkan perhitungan matematis fisika. Berdasarkan hal tersebut penelitian ini menghadirkan sistim analitis berbasir web yang diranvang dapat menganalisis variabel apa saja

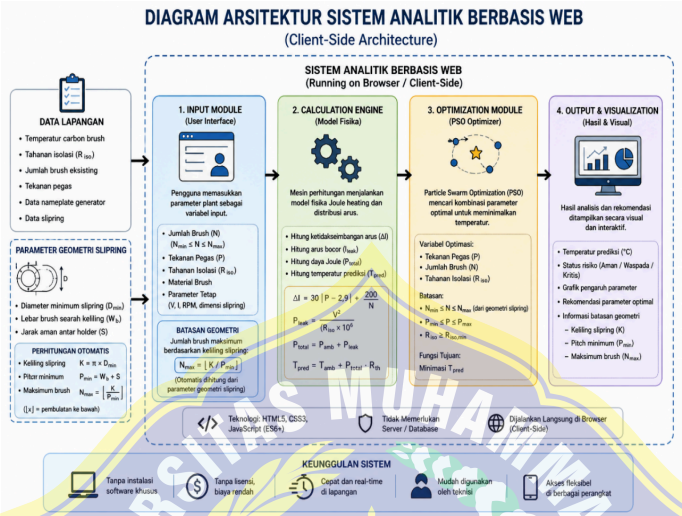
yang dapat berpengaruh terhadap kenaikan suhu carbon brush dan mengoptimalkan seting tekanan pegas jumlah dan tahanan isolasi sehingga dapat diprediksi suhu output dan operasional pembangkit menjadi optimal

3.10.2 Arsitektur Sistem

Java Scrib Arsitektur *client-side* berbasis HTML5 sebagai sistem analitik yang beroperasi secara langsung melalui web browser sehingga tidak bergantung pada server backend dan tidak bergantung pada jaringan internet, hal ini dikarenakan sebagaian besar lokasi power house di indonesia sulit untuk mengakses jaringan internet. Arsitektur dari sistem ini dibangun oleh empat modul yaitu:

1. Input Module
2. Calculation Engine
3. Optimization Module
4. Output and Visualization Module

Agar mempermuda memahami alur kerja sistem analitik ini dikembangkan maka dapat dilihat diagram arsitektur yang menunjukan hubungan antara sistem modul dan sistem berbasis web. Gambar 3.15 Diagram Arsitektur Sistem Analitik Berbasis Web



Gambar 3.15 Diagram Arsitektur Sistem

3.11 Desain Modul Sistem

3.11.1 Input Module

Lewat modul ini, pengguna dapat memasukkan berbagai parameter awal yang dibutuhkan, seperti kuantitas brush (N), kekuatan tekanan pegas (P), dan besaran tahanan isolasi (R {iso}). Kita berfokus pada variabel-variabel tersebut karena ketiganya merupakan faktor fundamental yang paling kuat memengaruhi akumulasi panas pada komponen carbon brush.

3.11.2 Calculation Engine

Peran vital sebagai inti dari sistem analitik ini dipegang oleh modul tersebut, yang mengemban tugas untuk menjalankan seluruh perhitungan berbasis model matematis dari Bab III. Di sini, sistem akan mengolah data untuk menemukan nilai ketidakseimbangan arus (Delta I), rugi-rugi daya yang dipicu oleh adanya arus bocor (P {leak}), serta melakukan estimasi terhadap suhu operasional carbon brush (T {pred}).

3.11.3 Optimization Module (PSO)

Modul optimasi menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) yang diimplementasikan dalam bahasa JavaScript. Modul ini bertujuan untuk mencari kombinasi parameter yang menghasilkan temperatur minimum serta distribusi arus yang optimal.

3.11.4 Output and Visualization Module

Modul ini berfungsi untuk menampilkan hasil analisis dalam bentuk numerik dan visual, seperti nilai temperatur prediksi, tingkat risiko overheating, serta rekomendasi parameter operasi yang optimal.

3.12 Implementasi Teknologi

Integrasi antara HTML5 untuk tata letak visual dan JavaScript untuk pemrosesan logika menjadi fondasi utama dalam pembangunan sistem berbasis web ini. Arsitektur *client-side* yang diterapkan memastikan bahwa seluruh perhitungan matematika diselesaikan langsung oleh *browser* pengguna. Pemilihan sistem yang tanpa memerlukan jaringan dan beroperasional mandiri ini pada *server* pusat maupun aplikasi komputasi premium seperti MATLAB. Dengan tujuan pengguna ini lebih fleksibilitas saat pengoperasian dan sangat potensial untuk diterapkan secara praktis di area ruang kontrol pembangkit.

3.13 Keunggulan Sistem

Keunggulan system ini antara lain:

1. Tanpa harus berlisensi karena sistim analitik diciptan sendiri
2. Penggunaan langsung melalui web browser
3. Mudah dalam penggunaan
4. Dapat menyimulasikan kondisi variable yang terkait dalam system eksitasi

Berdasarkan kelebihan sistem ini dapat diandalkan sebagai

alat bantu pengambilan keputusan teknis guna mengatasi *overheating* pada *Carbon brush.* Hasil ini memperkuat penelitian terdahulu [9], yang menyatakan bahwa sistem monitoring digital pada rotor generator berkontribusi signifikan terhadap peningkatan keandalan operasi lewat kemampuannya dalam menganalisis kondisi secara langsung (*real-time*).

3.14 Waktu Penelitian

Berikut ini adalah *Timeline* kegiatan Analisa Teknis *Overheating pada Carbon Brush* dan Strategi Penanganan untuk Optimalisasi Keandalan Sistem Eksitasi Generator di PLTA Tulungagung. Dibawah ini Tabel *Timeline* pelaksanaan

Tabel 3.9 Rencana Waktu Pelaksanaan Penelitian

Timeline Analisis Teknis Overheating pada Carbon Brush dan Strategi Penanganan untuk Optimalisasi Keandalan Sistem Eksitasi Generator di PLTA Tulungagung

KEGIATAN	September		Oktober								November								Mei							
	Minggu 4		Minggu 1		Minggu 2		Minggu 3		Minggu 4		Minggu 1		Minggu 2		Minggu 3		Minggu 4		Minggu 1		Minggu 2		Minggu 3		Minggu 4	
	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi	Rencana	Realisasi
Diskusi dan Brainstorming terkait permasalahan Karbon Brush (KSF **Review karbon Brush**)	Minggu 4	28/09/2025																								
Pengumpulan Data Pengukuran Suhu			Minggu 1	Minggu 1																						
Pencarian Literatur					Minggu 2	Minggu 2																				
Asistensi							Minggu 3	24/09/2025																		
Seminar Proposal							Minggu 4	30/09/2025																		
Analisa Permasalahan									Minggu 4	Minggu 4	Minggu 1	Minggu 1	Minggu 2	Minggu 2												
Pelaksanaan FDT															Minggu 3	Minggu 3	Minggu 4	Minggu 4								
Monitoring dan Evaluasi																			Minggu 1	Minggu 1	Minggu 2	Minggu 2				
Sidang Tugas Akhir																										