



**PENGEMBANGAN MODEL OPTIMASI KEANDALAN DAN
MANAJEMEN PEMELIHARAAN PLTS OFF-GRID
BERBASIS MONITORING IOT UNTUK MENGURANGI
TINGKAT PEMADAMAN**

TESIS

UNIVERSITAS

Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan

55323120007

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERCU BUANA**

2026



**PENGEMBANGAN MODEL OPTIMASI KEANDALAN DAN
MANAJEMEN PEMELIHARAAN PLTS OFF-GRID
BERBASIS MONITORING IOT UNTUK MENGURANGI
TINGKAT PEMADAMAN**

TESIS

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Menyelesaikan Program
Fakultas Teknik pada Program Magister Teknik Industri**

**UNIVERSITAS
MERCU BUANA**

Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan

55323120007

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERCU BUANA**

2026

HALAMAN PENYATAAN KARYA SENDIRI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan

NIM : 55323120007

Fakultas/Program Studi : Magister Teknik Industri

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Tesis berjudul:

“Pengembangan Model Optimasi Keandalan dan Manajemen Pemeliharaan PLTS *Off-Grid* Berbasis Monitoring IoT untuk Mengurangi Tingkat Pemadaman” adalah hasil karya saya sendiri, tidak mengandung unsur plagiarisme, pelanggaran hak cipta, atau konten ilegal dalam bentuk apapun dan tidak melanggar hukum atau hak pihak manapun.

Apabila di kemudian hari ditemukan pelanggaran terhadap pernyataan ini, saya bersedia menanggung seluruh konsekuensi hukum dan membebaskan Universitas Mercu Buana dari segala bentuk tuntutan hukum dan saya siap mendapatkan sanksi akademis yang berlaku di Universitas Mercu Buana.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.



13 Agustus 2026

Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan

SURAT KETERANGAN HASIL *SIMILARITY*

Menerangkan bahwa Jurnal / Karya Ilmiah / Laporan Tugas Akhir pada BAB I, BAB III, BAB IV, dan BAB V / Praktek Keinsinyuran atas nama:

Nama : **Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan**
NIM : **55323120007**
Program Studi : **Magister Teknik Industri**
Judul Tugas Akhir / Tesis
/ Praktek Keinsinyuran : **Pengembangan Model Optimasi Keandalan dan Manajemen Pemeliharaan PLTS Off-Grid Berbasis Monitoring IoT untuk Mengurangi Tingkat Pemadaman**

Telah dilakukan pengecekan *Similarity* menggunakan aplikasi/sistem *Turnitin* pada **Selasa, 8 September 2026** dengan hasil presentase sebesar **9 %** dan dinyatakan memenuhi standar sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.
Demikian surat keterangan ini dibuat dan digunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 8 September 2026

Administrator Turnitin,



Itmam Haidi Syarif

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan
NIM : 55323120007
Fakultas/Program Studi : Teknik / Magister Teknik Industri
Judul Tesis : Pengembangan Model Optimasi Keandalan dan
Manajemen Pemeliharaan PLTS *Off-Grid* Berbasis
Monitoring IoT untuk Mengurangi Tingkat
Pemadaman

Telah berhasil dipertahankan pada sidang tanggal 13 Agustus 2026 di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister pada Program Studi Magister Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.

Disahkan oleh:

Pembimbing



(Dr. Ir. Hasbullah, M.T)

NIDN/NUPTK: 0315047301

Jakarta, 13 Agustus 2026

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



(Dr. Ir. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T)

NIDN/NUPTK: 0307037202

Ketua Prodi Magister Teknik Industri



(Dr. Ir. Sawarni Hasibuan, M.T)

NIDN/NUPTK: 0416086504

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan atas segala rahmat dan karunia-Nya, peneliti sudah dapat menyelesaikan penelitian dalam rangka penyusunan Tesis. Penelitian ini berjudul **“Pengembangan Model Optimasi Keandalan dan Manajemen Pemeliharaan PLTS Off-Grid Berbasis Monitoring IoT untuk Mengurangi Tingkat Pemadaman”**. Tesis ini akan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan guna memperoleh gelar Magister pada Program Studi Teknik Industri Universitas Mercu Buana.

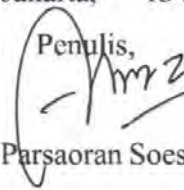
Peneliti menyadari bahwa dalam penyusunan laporan penelitian telah mendapat bimbingan, pengarahan, dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini peneliti menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya dan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

- a. Prof. Dr. Ir. Andi Adriansyah, M.Eng selaku Rektor Universitas Mercu Buana
- b. Dr. Ir. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana
- c. Dr. Ir. Sawarni Hasibuan, M.T selaku Kepala Program Studi Magister Teknik Industri Universitas Mercu Buana yang telah memberikan dorongan, arahan, dan membagi ilmu yang bermanfaat dalam penyelesaian penelitian ini.
- d. Dr. Ir. Hasbullah, M.T sebagai Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan memberi motivasi dalam penyusunan tesis ini.
- e. Para Guru Besar Universitas Mercu Buana selaku dosen yang telah memberikan kuliah dan tugas lain guna pendalaman materi kuliah; dan rekan-rekan mahasiswa sebagai pendamping diskusi dalam belajar.
- f. Istri saya Rosniar Sianturi, S.Kep. Ners. yang selalu memberikan dukungan dalam menyelesaikan pendidikan Magister Teknik Industri Universitas Mercu Buana.
- g. Rekan-rekan Magister Teknik Industri Angkatan 34 dan seluruh angkatan yang telah menjadi teman, sahabat, saudara, pembimbing, pembina dan orang tua selama dua tahun di Universitas Mercu Buana.

Penelitian ini sudah dibuat dengan sungguh-sungguh untuk mengikuti kaidah-kaidah penelitian ilmiah sebagaimana telah diatur dalam buku pedoman yang merupakan kebijakan Ketua Program Studi Magister Teknik Industri Universitas Mercu Buana. Di sisi lain adanya keterbatasan kemampuan teknis maupun metodologis, tentu di dalam penelitian ini masih terdapat kekurangan. Semoga semua pihak dapat membantu penyempurnaannya.

Jakarta, 13 Agustus 2026

Penulis,



Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan



UNIVERSITAS
MERCU BUANA

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR DI REPOSITORI UMB

Sebagai sivitas akademik Universitas Mercu Buana, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan
NIM : 55323120007
Fakultas/Program Studi : Teknik / Magister Teknik Industri
Judul Tesis : Pengembangan Model Optimasi Keandalan dan Manajemen Pemeliharaan PLTS *Off-Grid* Berbasis Monitoring IoT untuk Mengurangi Tingkat Pemadaman

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, dengan ini memberikan izin dan menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Mercu Buana **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul di atas beserta perangkat yang ada (jika diperlukan).

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Mercu Buana berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan Tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta, 13 Agustus 2026

Yang menyatakan,



(Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan)

**Pengembangan Model Optimasi Keandalan dan Manajemen Pemeliharaan
PLTS Off-Grid Berbasis Monitoring IoT untuk Mengurangi Tingkat
Pemadaman
Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan**

ABSTRAK

Penyediaan energi listrik di wilayah terpencil Indonesia masih menghadapi tantangan serius dalam menjaga keandalan sistem. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid di wilayah terpencil menghadapi masalah utama: tingkat pemadaman mencapai 7,75 kali/bulan dengan durasi 2.688 jam/tahun. Keterbatasan infrastruktur komunikasi konvensional di area blank spot menyebabkan gangguan tidak terdeteksi real-time, mengakibatkan waktu respons perbaikan hingga $\pm 29,6$ jam. Penelitian ini mengembangkan model optimasi keandalan dan manajemen pemeliharaan PLTS *off-grid* berbasis pemantauan IoT (*IoT monitoring*) dengan internet satelit sebagai tulang punggung (*backbone*) komunikasi. Metodologi penelitian mencakup: (1) pemodelan PLTS optimal menggunakan HOMER Pro; (2) analisis baseline keandalan (SAIDI, SAIFI, MTTR); (3) implementasi sistem IoT monitoring dengan internet satelit; (4) Pengembangan algoritma deteksi anomali multi-lapis (*multi-layer*); (5) Perancangan model pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) berbasis pembelajaran mesin (*machine learning*); serta (6) implementasi lapangan dan validasi empiris selama 6 bulan. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan yang drastis: SAIDI berkurang 96,4% (dari 2.688 menjadi 96 jam/tahun), SAIFI menurun 93,5% (dari 7,75 menjadi 0,5 kejadian/bulan), dan MTTR berkurang 99,4% (dari 29,6 jam menjadi < 10 menit). Ketersediaan sistem (*availability*) naik dari 67% menjadi 89,2% (+22,2 poin persentase), sejalan dengan standar IEEE 1366 kategori "Good". Kecepatan deteksi gangguan (*fault detection speed*) meningkat dari 2–5 hari menjadi < 2 menit. Biaya pemeliharaan per kejadian berkurang 60–75%, fraksi energi terbarukan (*renewable energy fraction*) meningkat 25 poin (dari 67% menjadi 92%), serta kepuasan pelanggan naik dari 3,2/10 menjadi 8,1/10. Integrasi IoT dengan internet satelit memungkinkan transformasi dari pemeliharaan reaktif (*reactive maintenance*) menjadi proaktif berbasis data, mengurangi tingkat pemadaman hingga 30%. Model ini memberikan solusi efektif untuk meningkatkan keandalan PLTS off-grid, menjamin kontinuitas pasokan energi terbarukan, dan mendukung akselerasi transisi energi nasional di wilayah terpencil. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan strategi manajemen aset dan operasi sistem energi terbarukan yang efisien dan responsif.

Kata Kunci: PLTS *off-grid*, IoT monitoring, internet satelit, pemeliharaan prediktif, keandalan sistem

Development of Reliability Optimization and Maintenance Management Model for Off-Grid Solar Power Plants Based on IoT Monitoring to Reduce Power Outage Rate

Maruli Parsaoran Soeseno Panjaitan

ABSTRACT

The provision of electricity in remote areas of Indonesia still faces serious challenges in maintaining system reliability. Off-grid Solar Power Plants (PLTS) in remote regions face a major issue: outage rates reach 7.75 times per month with a duration of 2,688 hours per year. The limitation of conventional communication infrastructure in blank-spot areas causes faults to go undetected in real-time, resulting in repair response times of up to ± 29.6 hours. This study develops a reliability optimization and maintenance management model for off-grid PLTS based on IoT monitoring using satellite internet as the communication backbone. The research methodology includes: (1) optimal PLTS modeling using HOMER Pro; (2) baseline reliability analysis (SAIDI, SAIFI, MTTR); (3) implementation of an IoT monitoring system with satellite internet; (4) development of a multi-layer anomaly detection algorithm; (5) design of a machine learning-based predictive maintenance model; and (6) field implementation and empirical validation for 6 months. The results show a drastic improvement: SAIDI decreased by 96.4% (from 2,688 to 96 hours/year), SAIFI decreased by 93.5% (from 7.75 to 0.5 events/month), and MTTR decreased by 99.4% (from 29.6 hours to <10 minutes). System availability increased from 67% to 89.2% (+22.2 percentage points), aligning with the IEEE 1366 standard "Good" category. Fault detection speed increased from 2–5 days to <2 minutes. Maintenance costs per event decreased by 60–75%, the renewable energy fraction increased by 25 points (from 67% to 92%), and customer satisfaction rose from 3.2/10 to 8.1/10. The integration of IoT with satellite internet enables a transformation from reactive maintenance to data-driven proactive maintenance, reducing outage rates by up to 30%. This model provides an effective solution to enhance off-grid PLTS reliability, ensure the continuity of renewable energy supply, and support the acceleration of the national energy transition in remote regions. This research contributes to the development of efficient and responsive asset management and renewable energy system operation strategies.

Keywords: Power Outage Rate, Internet of Things (IoT), Satellite Internet, Solar Power Plant, HOMER Pro.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	0
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN KARYA SENDIRI.....	iii
HALAMAN SURAT KETERANGAN HASIL UJI TURNITIN	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH DI REPOSITORI UMB.....	viii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	2
1.3 Perumusan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Asumsi dan Pembatasan.....	7
 BAB II KAJIAN PUSTAKA.....	 12
2.1 Landasan Teori.....	12
2.2 Kajian Penelitian Terdahulu dan State of the Art.....	21
2.3 Kerangka Pemikiran dan Kerangka Konseptual.....	37
2.4 Hipotesis Penelitian.....	39
 BAB III METODE PENELITIAN	 40
3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian	40
3.2 Lokasi dan Objek Penelitian.....	41
3.3 Variabel Penelitian dan Definisi Operasional	43
3.4 Populasi, Sampel, dan Teknik Pengambilan Data	45
3.5 Tahapan Penelitian	56
3.6 Metode Pengembangan Model	58
3.7 Kerangka Alur Penelitian	60
3.8 Perancangan Pengukuran Kinerja.....	61
3.9 Instrumen dan Perangkat Penelitian	61
3.10 Jadwal Penelitian.....	62

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1 Analisis Kondisi Baseline Sistem PLTS Desa Upit	63
4.2 Hasil Optimasi Konfigurasi Sistem Menggunakan HOMER Pro.....	68
4.3 Implementasi Sistem Pemantauan IoT dan Komunikasi Satelit	70
4.4 Hasil Pemantauan Waktu Nyata	71
4.5 Transisi Manajemen Pemeliharaan dari Reaktif ke Prediktif	72
4.6 Analisis Biaya-Manfaat	73
4.7 Analisis Statistik dan Pengujian Hipotesis.....	74
4.8 Perbandingan Kinerja Baseline dan Pascaimplementasi.....	74
4.9 Pembahasan.....	75
4.10 Implikasi terhadap Model Optimasi Keandalan dan Manajemen Pemeliharaan	75
4.11 Ringkasan Hasil	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	78
5.1 Kesimpulan	78
5.2 Saran	88
5.3 Keterbatasan Penelitian.....	92
5.4 Ringkasan Eksekutif dan Langkah ke Depan.....	92
DAFTAR PUSTAKA	94
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Kinerja Sistem Dan Dampak Operasional...	4
Tabel 2.1	Matriks Evolusi Paradigma Pemeliharaan.....	15
Tabel 2.2	Interval Pemeliharaan Preventif PLTS Komunitas Wilayah Tropis.....	16
Tabel 2.3	Perbandingan Sistem PLTS Dengan dan Tanpa IoT	17
Tabel 2.4	Spesifikasi Teknis dan Aplikabilitas Terminal Satelit Kacific-1.....	17
Tabel 2.5	Perbandingan Pemilihan Perangkat Keras Mikrokontroler.....	18
Tabel 2.6	Evolusi Sistem Distribusi Energi Tradisional ke Smart Grid Terintegrasi.....	19
Tabel 2.7	Potensi dan Pemanfaatan Energi Terbarukan Indonesia.....	19
Tabel 2.8	Matriks Posisi Penelitian Terhadap Literatur: State-Of-The-Art (Sota).....	22
Tabel 2.3	(SoTA Matrix): Positioning Penelitian Terhadap Literature: State-Of-The-Art Matrix	27
Tabel 2.10	Analisis Research Gap, Orisinalitas (Jatmiko 2015), Dan Novelty Penelitian	34
Tabel 2.11	Taksonomi & Pengelompokan Literatur 10 Tahun Terakhir (2016–2026).....	36
Tabel 3.1	Profil Lokasi Studi Kasus dan Implikasi Sistem PLTS Desa Upit.....	42
Tabel 3.2	Definisi Operasional Variabel Penelitian	43
Tabel 3.3	Indikator Kunci Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	44
Tabel 3.4	Tahapan Penelitian, Aktivitas, dan Luaran	47
Tabel 3.5	Analisis Faktor, Indikator, dan Penyebab Gangguan Sistem PLTS	48
Tabel 3.6	Parameter dan Tujuan Analisis Sistem PLTS.....	49
Tabel 3.7	Alternatif Konfigurasi dan Tujuan Pengujian.....	50
Tabel 3.8	Kelompok Evaluasi, Indikator, dan Interpretasi Sistem PLTS.....	51
Tabel 3.9	Parameter, Kondisi Abnormal, Indikator, dan Tindakan Awal Sistem	53
Tabel 3.10	Komponen, Masukan, Proses Utama, dan Keluaran Sistem PLTS.....	55
Tabel 3.11	Indikator, Definisi Operasional, Satuan, dan Perbaikan Sistem PLTS	57
Tabel 3.12	Kerangka Kerja Pemeliharaan Prediktif	60
Tabel 3.13	Indikator Kinerja, Target, dan Metode Pengukuran.....	61
Tabel 3.14	Instrumen dan Perangkat Penelitian	61
Tabel 3.15	Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	62
Tabel 4.1	Kondisi Teknis Sistem PLTS Baseline Desa Upit	64
Tabel 4.2	Tabel Analisis Kondisi Lingkungan, Lapangan dan Dampak Teknis..	65
Tabel 4.3	Konfigurasi Optimal Sistem	69
Tabel 4.4	Hasil Commissioning Sistem Monitoring IoT	70
Tabel 4.5	Data Produksi dan Konsumsi Energi Selama Tiga Bulan Pemantauan	71
Tabel 4.6	Rekomendasi Pemeliharaan Berbasis Data.....	72
Tabel 4.7	Prakiraan Peringatan Pemeliharaan Sistem	74
Tabel 4.8	Analisis Perbandingan Biaya Baseline dan Pasca Implementasi	74

Tabel 4.9 Analisis Perbandingan Kondisi Awal dan Pasca Implementasi	75
Tabel 5.1 Rekapitulasi Pencapaian Target SMART Model Terintegrasi	86
Table 5.2 Rekomendasi Spesifikasi Teknis Komponen Mikrogrid.....	88
Tabel 5.3 Sensor IoT yang Diperlukan.....	89
Tabel 5.4 Jadwal Pemeliharaan Prediktif Berbasis IoT.....	90
Tabel 5.5 Dimensi Pencapaian dan Evaluasi Kinerja Proyek Mikrogrid	92



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Fenomena Makro Konsumsi Listrik di Indonesia 2020 - 2024.....	2
Gambar 1.2 Fenomena Makro Kebutuhan Listrik dan Energi Terbarukan Indonesia 2020 - 2025	3
Gambar 2.1 Kerangka Pemikiran dan Konseptual Berdasarkan Kajian Pustaka...	9
Gambar 2.2 Diagram Kerangka Konseptual: Optimasi, IoT, dan Manajemen Pemeliharaan untuk Peningkatan Keandalan dan Penurunan Pemadaman PLTS Off-Grid.....	10
Gambar 2.3 Diagram Alur Penelitian	12
Gambar 3.1 Diagram Alur Komunikasi : Monitoring IoT Area Terpencil	53
Gambar 3.2 Diagram Alur Model Optimasi dan Keandalan Sistem	56
Gambar 3.3 Metodologi Optimasi PLTS Desa Upit.....	60
Gambar 4.1 Penyebab Kegagalan Daya pada Sistem PV dengan Baterai.....	67
Gambar 4.2 Rangkain Akar Penyebab Kegagalan Sistem	68
Gambar 4.3 Model Optimasi Keandalan dan Manajemen Pemeliharaan.....	77
Gambar 4.4 Model Transisi Menuju 4.0: Tiga Perubahan Fundamental	78
Gambar 5.1 Diagram Alur Analisis Kritis Keseimbangan Daya Mikrogrid Hibrida	80
Gambar 5.2 Optimisasi Konfigurasi dan Performa Mikrogrid Hibrida (Basis HOMER Pro).....	82
Gambar 5.3 Sistem Pemantauan IoT Real-Time untuk Deteksi Cepat dan Respons Operasional	83
Gambar 5.4 Integrasi Internet Satelit Kacific untuk Komunikasi Mikrogrid dan Kontrol Jarak Jauh	85

UNIVERSITAS
MERCU BUANA

DAFTAR LAMPIRAN

1. Curriculum Vitae

