

**OPTIMALISASI KINERJA PLTS DI INDONESIA MELALUI
PENDEKATAN ROOT CAUSE ANALYSIS PADA SELURUH
PERALATAN DAN OPERASIONAL PLTS**

Tesis

Untuk memenuhi salah satu syarat mencapai derajat pendidikan Strata Dua (S-2)
Sebagai Magister Energi pada Program Studi Magister Energi



Disusun Oleh :

**JON MARJUNI KADANG
30000420420026**

**PROGRAM STUDI MAGISTER ENERGI
SEKOLAH PASCASARJANA UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

AGUSTUS 2022

PERSETUJUAN UJIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini Dosen Pembimbing dari :

Mahasiswa : Jon Marjuni Kadang

NIM : 30000420420026

Program Studi: Magister Energi

Judul Tesis : Optimalisasi Kinerja PLTS di Indonesia melalui Pendekatan *Root Cause Analysis* pada Seluruh Peralatan dan Operasional PLTS

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut telah melaksanakan Ujian Proposal, Ujian Kemajuan Tesis dan Ujian Seminar Tesis sehingga menyetujui dan layak untuk melaksanakan Ujian Tesis.

Semarang, 26 Juli 2022

Dosen Pembimbing I



(Prof. Dr. Heri Sutanto, M.Si.)

NIP. 197502151998021001

Dosen Pembimbing II



(Dr. Singgih Saptadi, S.T., M.T.)

NIP. 197403162001121001

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Semarang, 26 Juli 2022



10000
METERAL
TEMPEL
1E3B1AJX692213472

Jon Marjuni Kadang
NIM. 30000420420026

**HALAMAN PENGESAHAN
TESIS**

**Optimalisasi Kinerja PLTS di Indonesia melalui Pendekatan *Root Cause Analysis*
pada Seluruh Peralatan dan Operasional PLTS**

Disusun Oleh :
JON MARJUNI KADANG
30000420420026

**Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji
Pada tanggal 2 Agustus 2022**

Tim Penguji,

Dosen Pembimbing I



(Prof. Dr. Heri Sutanto, M.Si.)

NIP. 197502151998021001

Penguji I

(Dr. Jaka Windarta, M.T., IPU, Asean.Eng.)

NIP. 196405261989031002

Dosen Pembimbing II



(Dr. Singgih Saptadi, S.T., M.T.)

NIP. 197403162001121001

Penguji II



(Dr. Denny Nurketamanda, S.T.M.T.)

NIP. 197312211999031002

**Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Magister Energi
Tanggal 10 Agustus 2022**

Kaprodi Magister Energi

Dekan Sekolah Pascasarjana

(Dr. Jaka Windarta, M.T., IPU, Asean.Eng.)

NIP. 196405261989031002

(Dr. R.B. Sularto, S.H., M.Hum.)

NIP. 196701011991031005

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Jon Marjuni Kadang
NIM : 30000420420026
Program Studi : Magister Energi
Sekolah : Program Pascasarjana
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Optimalisasi Kinerja PLTS di Indonesia melalui Pendekatan *Root Cause Analysis*
pada Seluruh Peralatan dan Operasional PLTS

Beserta perangkat yang ada. Dengan Hak bebas Royalti Noneksklusif ini Program Studi Magister Energi Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia/ formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database) merawat, dan mempublikasikan tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Dibuat di : Semarang
Pada tanggal : 26 Juli 2022
Yang menyatakan


Jon Marjuni Kadang
NIM. 30000420420026

KATA PENGANTAR

Syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas anugerah-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul Optimalisasi Kinerja PLTS di Indonesia melalui Pendekatan *Root Cause Analysis* pada Seluruh Peralatan dan Operasional PLTS. Tesis dilakukan pada berbagai jenis dan kapasitas PLTS serta lokasi yang berbeda di Indonesia. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat mencapai derajat pendidikan Strata Dua (S-2) sebagai Magister Energi pada Program Studi Magister Energi, Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro.

Ungkapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberi dukungan dalam penyusunan Tesis ini, khususnya kepada:

1. Dr. R.B. Sularto, S.H., M.Hum., selaku Dekan Pascasarjana, Universitas Diponegoro Semarang.
2. Dr. Jaka Windarta, M.T., IPU, Asean.Eng., selaku Ketua Program Studi Magister Energi Universitas Diponegoro Semarang dan juga Dosen Wali.
3. Prof. Dr. Heri Sutanto, M.Si. dan Dr. Singgih Saptadi, S.T, M.T., selaku Dosen Pembimbing.
4. Helfberd Tampubolon, S.T, M.T. selaku Manager PT PLN (Persero) UPDL Semarang dan juga Atasan yang telah mendukung.
5. Manajemen dan Pegawai di PT PLN (Persero) UPDL Makassar dan PT PLN (Persero) UIW Maluku & Maluku Utara yang telah mendukung data Tesis.
6. Orang Tua, Istri (Fiyonna Ruga), dan Anak (Keenan Nehemia Joachim, Matthea Sintikhe Elishua) yang selalu mendukung dan memberi semangat.
7. Bapak dan Ibu dosen Magister Energi yang telah memberikan pembelajaran.
8. Teman - teman Magister Energi atas dukungan dan kerjasamanya selama ini.

Penulis membutuhkan masukan yang membangun untuk pengembangan Tesis ini. Semoga Tesis ini memperoleh perkenan dari Tuhan Yang Maha Esa dan ilmu yang diperoleh menjadi ilmu yang bermanfaat bagi semua, amin.

Semarang, 26 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Persetujuan Ujian Tesis.....	ii
Pernyataan Orisinalitas.....	iii
Halaman Pengesahan	Error! Bookmark not defined.
Pernyataan Persetujuan Publikasi Tesis Untuk Kepentingan Akademis	v
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi.....	vii
Daftar Tabel	ix
Daftar Gambar.....	xi
Daftar Lampiran	xiii
Intisari	xiv
Abstract	xv
Bab I Pendahuluan	Error! Bookmark not defined.
1.1. Latar Belakang	Error! Bookmark not defined.
1.2. Rumusan Masalah	Error! Bookmark not defined.
1.3. Tujuan Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
1.4. Manfaat Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
1.5. Orisinalitas Penelitian	Error! Bookmark not defined.
Bab II Tinjauan Pustaka	Error! Bookmark not defined.
2.1. Kinerja PLTS	Error! Bookmark not defined.
2.1.1. Energi matahari	Error! Bookmark not defined.
2.1.2. Sistem PLTS	Error! Bookmark not defined.
2.1.3. Karakteristik PLTS	Error! Bookmark not defined.
2.1.4. Analisis kinerja PLTS	Error! Bookmark not defined.
2.1.5. Produksi energi PLTS	Error! Bookmark not defined.
2.2. Metode <i>Root Cause Analysis</i>	Error! Bookmark not defined.
Bab III Metodologi Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.1. Lokasi Penelitian dan Jadwal Penelitian ...	Error! Bookmark not defined.
3.2. Jenis Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.

3.3. Kerangka Pikir Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.4. Ruang Lingkup Penelitian	Error! Bookmark not defined.
3.5. Jenis dan Sumber Data.....	Error! Bookmark not defined.
3.6. Teknik Pengumpulan Data	Error! Bookmark not defined.
3.7. Teknik Analisis Data	Error! Bookmark not defined.
3.7.1. Analisis produksi energi PLTS	Error! Bookmark not defined.
3.7.2. Metode pencarian dan penyelesaian masalah di PLTS .	Error! Bookmark not defined.
3.7.2.1. Analisis peralatan	Error! Bookmark not defined.
3.7.2.2. Analisis non peralatan.....	Error! Bookmark not defined.
3.7.2.3. Agregasi penyebab <i>losses</i> pada produksi energi PLTS.....	Error! Bookmark not defined.
3.7.2.4. Penyusunan <i>action plan</i>	Error! Bookmark not defined.
3.7.2.5. Penentuan rekomendasi skala prioritas <i>action plan</i>	Error! Bookmark not defined.
Bab IV Hasil dan Pembahasan.....	Error! Bookmark not defined.
4.1. <i>Root Cause Analysis</i> pada Kinerja PLTS I.....	Error! Bookmark not defined.
4.2. <i>Root Cause Analysis</i> pada Kinerja PLTS II.....	Error! Bookmark not defined.
4.3. <i>Root Cause Analysis</i> pada Kinerja PLTS III	Error! Bookmark not defined.
4.4. Rangkuman Penelitian	Error! Bookmark not defined.
Bab V Kesimpulan	Error! Bookmark not defined.
5.1. Kesimpulan.....	Error! Bookmark not defined.
5.2. Saran	Error! Bookmark not defined.
Daftar Pustaka	Error! Bookmark not defined.
Lampiran A. Data Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Lampiran B. Hasil Simulasi <i>Losses</i>	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Peluang penelitian	Error! Bookmark not defined.
Tabel 1.2. Ringkasan penelitian terdahulu	Error! Bookmark not defined.
Tabel 1.3. Posisi penelitian	Error! Bookmark not defined.
Tabel 2.1. Parameter evaluasi kinerja PLTS	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3.1. Jadwal penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3.2. Contoh <i>checklist</i> untuk optimasi <i>Merit Order</i>	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3.3. Contoh agregasi penyebab losses pada produksi energi PLTS.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3.4. Contoh penyusunan <i>action plan</i>	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3.5. Contoh rekomendasi skala prioritas <i>action plan</i>	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.1. Spesifikasi PLTS I	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.2. Produksi energi listrik PLTS I (aktual)	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.3. Hasil penelitian kinerja PLTS I.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.4. Pembahasan kinerja PLTS I.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.5. Agregasi <i>losses</i> produksi energi listrik PLTS I	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.6. Perbandingan PR aktual dan PR hasil <i>root cause analysis</i> PLTS I	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.7. <i>Action plan</i> penanganan <i>losses</i> PLTS I.	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.8. Rekomendasi skala prioritas <i>action plan</i> PLTS I	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.9. Spesifikasi PLTS II	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.10. Produksi energi listrik PLTS II (aktual)	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.11. Hasil penelitian kinerja PLTS II	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.12. Pembahasan kinerja PLTS II	Error! Bookmark not defined.

Tabel 4.13. Agregasi *losses* produksi energi listrik PLTS II **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.14. Perbandingan PR aktual dan PR hasil *root cause analysis* PLTS II **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.15. *Action plan* penanganan *losses* PLTS II **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.16. Rekomendasi skala prioritas *action plan* PLTS II **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.17. Spesifikasi PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.18. Produksi energi listrik PLTS III (data aktual) **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.19. Hasil penelitian kinerja PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.20. Pembahasan kinerja PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.21. Agregasi *losses* produksi energi listrik PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.22. Perbandingan PR aktual dan PR hasil *root cause analysis* PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.23. *Action plan* penanganan *losses* PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.24. Rekomendasi skala prioritas *action plan* PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.25. Rangkuman penelitian **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.26. Analisis hasil penelitian terhadap penelitian sebelumnya **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1. *Peak sun hours***Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.2. Radiasi energi matahari sampai ke bumi**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.3. Tingkat radiasi matahari.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.4. Kurva I-V**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.5. *Maximum power point*.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.6. Temperatur operasi.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.7. Kurva I-V pada temperatur yang berbeda **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.8. Dampak *shading*.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.9. Rangkaian evaluasi kinerja PLTS**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.10. Metode RCA: *5 why analysis***Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.11. Metode RCA: fishbone diagram**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.12. Metode RCA: *logic tree***Error! Bookmark not defined.**

Gambar 2.13. Contoh RCA: *logic tree* investigasi criminal**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.1. Lokasi penelitian PLTS**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.2. Kerangka pikir penelitian.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.3. Tahapan penelitian**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.4. Lingkup penelitian.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.5. Batasan sumber permasalahan dan arah penelusuran analisis .. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.6. Mekanisme pencarian & penyelesaian masalah kinerja PLTS . **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.7. Diagram *root cause analysis* pada PLTS**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.8. Diagram analisis *energy input*.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.9. Diagram analisis PV Array**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.10. Diagram analisis distribusi pada sisi DC**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.11. Diagram analisis *Inverter***Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.12. Diagram analisis baterai**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.13. Diagram analisis distribusi pada sisi AC**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.1. *Layout* Lokasi PLTS I**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.2. *Single line diagram* PLTS I.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.3. Potensi produksi energi listrik PLTS I**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.4. Kondisi modul surya PLTS I.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.5. Kondisi distribusi sisi DC PLTS I.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.6. Kondisi inverter PLTS I**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.7. Kondisi distribusi sisi AC PLTS I.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.8. Diagram *root cause analysis* PLTS I **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.9. Grafik agregasi *losses* produksi energi listrik PLTS I..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.10. *Layout* Lokasi PLTS II.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.11. *Single line diagram* PLTS II**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.12. Potensi produksi energi listrik PLTS II**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.13. Kondisi modul surya PLTS II**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.14. Kondisi distribusi pada sisi DC PLTS II**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.15. Kondisi *inverter* PLTS II**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.16. Kondisi baterai PLTS II**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.17. Kondisi distribusi pada sisi AC PLTS II**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.18. Diagram *root cause analysis* PLTS II**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.19. Grafik agregasi *losses* produksi energi listrik PLTS II **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.20. *Layout* Lokasi PLTS III.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.21. *Single line diagram* PLTS III**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.22. Potensi produksi energi listrik PLTS III**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.23. Kondisi modul surya PLTS III**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.24. Kondisi distribusi sisi DC PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.25. Kondisi *inverter* PLTS III**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.26. Kondisi distribusi sisi AC PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.27. Diagram *root cause analysis* PLTS III**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.28. Grafik agregasi *losses* produksi energi listrik PLTS III **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Data Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Lampiran B. Hasil Simulasi <i>Losses</i>	Error! Bookmark not defined.

INTISARI

PLTS dengan kapasitas, jenis, dan lokasi yang beragam telah dibangun di Indonesia sejak 2011 hingga sekarang, beberapa memiliki kinerja kurang optimal bahkan tidak bertahan lama. Keterbatasan pengelolaan dan penyelesaian masalah PLTS menjadi kendala utama. Beberapa penelitian analisa kinerja PLTS telah dilakukan namun masih bersifat parsial, belum menyeluruh dari seluruh aspek peraltan dan operasional PLTS. Dibutuhkan evaluasi secara menyeluruh melalui penelusuran penyebab akar masalah pada PLTS yang mudah dipahami dan mudah dilakukan secara umum pada berbagai jenis PLTS. Pada penelitian ini dilakukan analisis kinerja PLTS melalui *Root Cause Analysis* berikut rekomendasi tindak lanjut penyelesaiannya. Hasil penelitian PLTS I (50 kWp, *On Grid*), PLTS II (100 kWp, *Off Grid*), dan PLTS III (350 kWp, *On Grid*) yang lokasinya tersebar pada pulau Sulawesi dan Maluku menunjukkan kinerja PLTS II dan PLTS III belum optimal (*Performance Ratio* < 60%) sedangkan PLTS I optimal. Hasil agregasi penyebab losses terbesar berasal dari Inverter, Baterai, dan Modul Surya. Hasil *Root Cause Analysis* menunjukkan *losses* disebabkan faktor belum memadainya *Standing Operational Procedure* (SOP) Pengoperasian dan Pemeliharaan, desain dan konstruksi kurang andal, kualitas material rendah, serta kompetensi Operator PLTS kurang memadai. Direkomendasikan prioritas penggantian Modul Surya, Inverter, dan Baterai yang rusak termasuk inovasi pada desain, kualitas material, konstruksi, serta optimalisasi SOP Pengoperasian dan Pemeliharaan, dan juga program pelatihan berkala Operator PLTS. Berdasarkan hasil penelitian, keseluruhan upaya optimalisasi kinerja PLTS melalui pendekatan *Root Cause Analysis* mudah dipahami dan mudah digunakan secara umum untuk berbagai jenis dan kapasitas PLTS dan lokasi yang berbeda untuk mengoptimalkan rencana tindak lanjut perbaikan secara efektif untuk keberlanjutan operasi PLTS.

Kata Kunci: PLTS, Kinerja, *Losses*, *Root Cause Analysis*.

ABSTRACT

Photovoltaic Power Plant (PLTS) with various capacities, types and locations have been built in Indonesia since 2011 until now, some of which have less than optimal performance and even do not last long. The limited management and problem solving of communal PLTS is the main obstacle. Several PLTS performance analysis studies have been conducted but are still partial, not comprehensive from all aspects of PLTS equipment and operations. A thorough search is needed through the root causes of PLTS which are easily accessible and generally carried out on various types of PLTS. In this study, PLTS performance analysis was carried out through Root Cause Analysis and its follow-up to completion. The results of the research of PLTS I (50 kWp, On Grid), PLTS II (100 kWp, Off Grid), and PLTS III (350 kWp, On Grid) located on the islands of Sulawesi and Maluku indicate that the performance of PLTS II and PLTS III is not optimal (Performance Ratio < 60%) while PLTS I is optimal. The results of the aggregation of the biggest causes of losses come from Inverters, Batteries, and Solar Modules. The results of Root Cause Analysis show that these losses are caused by inadequate Standing Operational Procedures (SOP) for Operation and Maintenance, unreliable design and construction, low material quality, and inadequate PLTS operator competence. Recommendations for replacing damaged Solar Modules, Inverters, and Batteries including design innovation, material quality, construction, and SOP optimization, as well as periodic training programs for PLTS Operators. Based on the research results, the overall effort to optimize PLTS performance through the Root Cause Analysis approach is easy to understand and easy to use in general for various types and capacities of PLTS and different locations to optimize follow-up plans for improvements effectively for the sustainability of a PLTS operation.

Keywords: *PV Power Plant, Performance, Losses, Root Cause Analysis.*