UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis tekno-ekonomi dan operasional sistem mikrogrid hybrid PLTD PLTS dan BESS dalam mengurangi konsumsi bahan bakar fosil pada sistem kelistrikan terisolasi Nusa Penida
RICHARD BENJAMIN OTNIEL SIHOMBING, Prof. Dr. Eng. Ir. F. Danang Wijaya, S.T., M.T., IPM. ; Dr.-Ing. Ir. Yohar
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL vii
HALAMAN PERSETUJUAN vii
HALAMAN PENGESAHAN vii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI viiv
PRAKATA vii
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL x
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN xii
ABSTRAK xiii
ABSTRACT xiv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Penelitian 3
1.4 Tujuan Penelitian 4
1.5 Keaslian dan Kontribusi Penelitian 4
1.6 Manfaat Penelitian 6
1.7 Sistematika Penulisan 6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 8
2.1 Tinjauan Pustaka 8
2.1.1 Potensi Energi Matahari di Indonesia 9
2.1.2 Sistem *Hybrid* pada *Microgrid* 10
2.1.3 Sistem Operasi dan *Energy Management System* (EMS) 12
2.1.4 Optimasi Sistem *Hybrid* 13
2.1.5 Studi Kasus Sistem *Hybrid* di Nusa Penida 14
2.1.6 Kesenjangan Penelitian dan Kontribusi Penelitian 16
2.2 Landasan Teori 19
2.2.1 Sistem *Microgrid* 20
2.2.2 Sistem *Hybrid* PLTD, PLTS dan BESS 21
2.2.3 Model Energi dan Performa PV 24
2.2.4 Model *Battery Energy Storage System* (BESS) dan *State of Charge* (SO..27
2.2.5 Karakteristik *Diesel generator* 30
2.2.6 *Energy Management System* (EMS) 32
2.2.7 Optimasi Sistem Mikrogrid 34
2.2.8 Evaluasi Kinerja Sistem 37

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Analisis tekno-ekonomi dan operasional sistem mikrogrid hybrid PLTD PLTS dan BESS dalam mengurangi konsumsi bahan bakar fosil pada sistem kelistrikan terisolasi Nusa Penida
RICHARD BENJAMIN OTNIEL SIHOMBING, Prof. Dr. Eng. Ir. F. Danang Wijaya, S.T., M.T., IPM. ; Dr.-Ing. Ir. Yohar
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB III METODE PENELITIAN 41
3.1 Lokasi Penelitian 41
3.2 *Single Line Diagram* Sistem Ketenagalistrikan Nusa Penida 43
3.3 Profil Pembangkit *Hybrid* Nusa Penida 44
3.3.1 PLTD Indonesia Power Service (IPS) 46
3.3.2 PLTD Genindo 48
3.3.3 PLTD Panca Bina Persada 48
3.3.4 PLTD EDG (*Emergency Diesel generator*) 49
3.3.5 PLTS Nusa Penida 49
3.3.6 *Battery Energy Storage System* (BESS) Nusa Penida 50
3.4 Alat dan Bahan 51
3.4.1 Alat Penelitian 52
3.4.2 Bahan 52
3.5 Pemodelan Sistem dan Parameter Dinamis di DIgSILENT PowerFactory 53
3.5.1 Data Statis Sistem 54
3.5.2 Data Dinamis Sistem 56
3.6 Skenario Sistem *Dispatch* 59
3.6.1 Skenario 1 Sistem Diesel Eksisting (PLTD *Only*) 60
3.6.2 Skenario 2 Sistem *Hybrid* (PLTD, PLTS dan BESS) 62
3.7 Parameter Evaluasi Karakteristik Operasional dan Strategi *Dispatch* Sistem Nusa Penida 65
3.7.1 Reduksi Konsumsi Bahan Bakar 65
3.7.2 Reduksi Emisi Karbon (CO_2) 65
3.8 Simulasi RMS Menggunakan Digsilent *Power Factory* 66
3.8.1 Pengaturan Skenario Simulasi RMS 67
3.9 Parameter Evaluasi sisi Ekonomi Sistem *Hybrid* Nusa Penida 68
3.9.1 *Levelized Cost of Energy* (LCOE) 69
3.9.2 *Internal Rate of Return* (IRR) 69
3.9.3 *Payback Period* (PP) 69
3.10 Tahapan Penelitian 69
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 74
4.1 Analisis Karakteristik Operasional dan Kinerja Strategi *Dispatch* Pada Sistem *Hybrid* Nusa Penida 74
4.1.1 Analisis Skenario Strategi *Dispatch* Sistem Nusa Penida 75
4.2 Analisis Teknis Sistem *Hybrid* Nusa Penida 82
4.2.1 Analisis Profil Tegangan Hasil Simulasi *Load Flow* DIgSILENT 82
4.2.2 Analisis Frekuensi Hasil Simulasi RMS DIgSILENT 86
4.2.3 Analisis *Load Flow* Sistem SCADA Nusa Penida 95
4.2.4 Validasi Simulasi DIgSILENT dengan Data SCADA 99
4.2.5 Kesimpulan Analisis Teknis 101
4.3 Analisis Ekonomi Sistem *Hybrid* Nusa Penida 101
4.3.1 *Levelized Cost of Energy* (LCOE) 102
4.3.2 *Internal Rate of Return* (IRR) 103
4.3.3 *Payback Period* (PP) 103

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis tekno-ekonomi dan operasional sistem mikrogrid hybrid PLTD PLTS dan BESS dalam mengurangi konsumsi bahan bakar fosil pada sistem kelistrikan terisolasi Nusa Penida
RICHARD BENJAMIN OTNIEL SIHOMBING, Prof. Dr. Eng. Ir. F. Danang Wijaya, S.T., M.T., IPM. ; Dr.-Ing. Ir. Yohar
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.3.4 Kesimpulan Analisis Ekonomi 104

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 105

5.1 Kesimpulan 105

5.2 Saran 105

DAFTAR PUSTAKA 107

LAMPIRAN 1

1. Simulasi Digsilent *Load Flow* PLTD *only* sebelum gangguan 1
2. Digsilent *Load Flow* PLTD *only* setelah gangguan 2
3. Digslent *Load Flow* Penetrasi PLTS BESS sebelum gangguan 3
4. Digslent *Load Flow* Penetrasi PLTS BESS setelah gangguan 4
5. General Data PLTD (*Synchronous Machine*) 5
6. General Data PLTS 6
7. General Data BESS 7
8. General Data AVR 8
9. General Data Governor 9
10. Control *Microgrid System* Scada Nusa Penida 10
11. Spesifikasi PV Nusa Penida 11
12. Spesifikasi PV Inverter Nusa Penida 12
13. Spesifikasi BESS Nusa Penida 13
14. Produksi Pembangkit PLTS Nusa Penida 14
15. Global Horizon Irradiation 15
16. TML PLTD IPS 16

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis tekno-ekonomi dan operasional sistem mikrogrid hybrid PLTD PLTS dan BESS dalam mengurangi konsumsi bahan bakar fosil pada sistem kelistrikan terisolasi Nusa Penida
RICHARD BENJAMIN OTNIEL SIHOMBING, Prof. Dr. Eng. Ir. F. Danang Wijaya, S.T., M.T., IPM. ; Dr.-Ing. Ir. Yohar
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Keaslian Penelitian ---- 5
Tabel 2.1 Logika Kendali EMS Berdasarkan Kondisi Operasi Sistem ---- 13
Tabel 2.2 Identifikasi Kesenjangan Penelitian dan Kontribusi yang Diusulkan ---- 18
Tabel 2.3 Karakteristik Umum Sistem *Hybrid* PLTD, PLTS dan BESS ---- 24
Tabel 2.4 Karakteristik Sumber Energi Surya (*Photovoltaic*) ---- 27
Tabel 2.5 Karakteristik Umum BESS ---- 29
Tabel 2.6 Karakteristik Pembangkit Diesel (*Diesel generator*) ---- 32
Tabel 3.1 Konfigurasi dan Kapasitas Pembangkit pada Sistem *Hybrid* ---- 46
Tabel 3.2 Alat Penelitian ---- 52
Tabel 3.3 Data Bahan Penelitian ---- 53
Tabel 3.4 Data Statis System ---- 54
Tabel 3.5 Data Dinamis System ---- 56
Tabel 3.6 Data Produksi Pembangkit pada Kondisi Sistem tanpa Penetrasi ---- 61
Tabel 3.7 Produksi Pembangkit pada Kondisi Sistem dengan Penetrasi ---- 63
Tabel 3.8 Ringkasan Skenario Penelitian ---- 56
Tabel 4.1 Pola Operasi Sistem *Hybrid* Nusa Penida ---- 80
Tabel 4.2 Perbandingan Nilai Tegangan Busa pada Kondisi Diesel *Only* dan Penetrasi PLTS-BESS ---- 86
Tabel 4.3 Perubahan Daya Keluaran Unit PLTD Akibat Gangguan pada Simulasi RMS Kondisi Diesel *Only* ---- 87
Tabel 4.4 Perubahan Daya Keluaran Unit PLTD Akibat Gangguan pada Simulasi RMS Kondisi Penetrasi PLTS BESS ---- 91
Tabel 4.5 Hasil Validasi Simulasi DIgSILENT terhadap Data SCADA pada Kondisi PLTD *only* dan Penetrasi PLTS-BESS ---- 100

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis tekno-ekonomi dan operasional sistem mikrogrid hybrid PLTD PLTS dan BESS dalam mengurangi
konsumsi bahan bakar fosil pada sistem kelistrikan terisolasi Nusa Penida**
RICHARD BENJAMIN OTNIEL SIHOMBING, Prof. Dr. Eng. Ir. F. Danang Wijaya, S.T., M.T., IPM. ; Dr.-Ing. Ir. Yohar
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem *Hybrid* ---------- 11
Gambar 2.2 Sistem *Hybrid* Nusa Penida ---------- 16
Gambar 2.3 EMS dan Scada *Microgrid* ---------- 34
Gambar 3.1 Peta Sistem Pembangkit *Hybrid* Nusa Penida ---------- 42
Gambar 3.2 *Single Line Diagram* Sistem Ketenagalistrikan Nusa Penida ---------- 43
Gambar 3.3 Diagram Blok model *governor* IEEE TGOV1 ---------- 58
Gambar 3.4 Diagram Blok *Automatic Voltage Regulator* (AVR) ---------- 59
Gambar 3.5 *Single Line Diagram* Sederhana Sistem Ketenagalistrikan Nusa Penida pada Simulasi DIgSILENT ---------- 60
Gambar 3.6 Pengaturan Simulation Events dan Switch Event pada Simulasi RMS DIgSILENTowerFactory ---------- 68
Gambar 3.7 Skema Alur Penelitian ---------- 70
Gambar 4.1Perbandingan Strategi Dispatch Energi Sistem Diesel Only dan Sistem Hybrid Berdasarkan Data SCADA ---------- 79
Gambar 4.2 Profil Tegangan Hasil Simulasi *Load Flow* pada Kondisi Diesel *Only* 83
Gambar 4.3 Profil Tegangan Hasil Simulasi *Load Flow* pada Kondisi Penetrasi PLTS BES*S* ---------- 84
Gambar 4.4 Respon Frekuensi Sistem pada Kondisi Diesel *Only* Hasil Simulasi RMS DIgSILENT ---------- 89
Gambar 4.5 Respon Frekuensi Sistem pada Kondisi Penetrasi PLTS BESS Hasil Simulasi RMS DIgSILENT ---------- 92
Gambar 4.6 Tampilan SCADA Kondisi Frekuensi Sistem Sebelum Integrasi PLTS dan BESS ---------- 96
Gambar 4.7 Tampilan SCADA Kondisi Tegangan Sistem Sebelum Integrasi PLTS dan BESS ---------- 97
Gambar 4.8 Tampilan SCADA Kondisi Frekuensi Sistem Setelah Integrasi PLTS dan BESS ---------- 98
Gambar 4.9 Tampilan SCADA Kondisi Tegangan Sistem Setelah Integrasi PLTS dan BESS ---------- 98

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Analisis tekno-ekonomi dan operasional sistem mikrogrid hybrid PLTD PLTS dan BESS dalam mengurangi
konsumsi bahan bakar fosil pada sistem kelistrikan terisolasi Nusa Penida**
RICHARD BENJAMIN OTNIEL SIHOMBING, Prof. Dr. Eng. Ir. F. Danang Wijaya, S.T., M.T., IPM. ; Dr.-Ing. Ir. Yohar
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

PV	Photovoltaic - Sistem pembangkit listrik tenaga surya yang mengubah energi matahari menjadi listrik.
BESS	Battery Energy Storage System - Sistem penyimpanan energi listrik menggunakan baterai.
PLTD	Pembangkit Listrik Tenaga Diesel - Pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil (diesel).
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition - Sistem monitoring dan kontrol real-time pada pembangkit listrik.
EMS	Energy Management System - Sistem pengelolaan energi yang mengatur operasi pembangkitan dan penyimpanan energi.
SOC	State of Charge - Tingkat kapasitas energi yang tersimpan dalam baterai.
LCOE	Levelized Cost of Energy - Biaya rata-rata produksi listrik per kWh selama umur proyek.
NPV	Net Present Value - Nilai sekarang dari keuntungan bersih proyek.
IRR	Internal Rate of Return - Tingkat pengembalian investasi proyek.
PP	Payback Period - Waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal
PR	Performance Ratio - Indikator kinerja sistem PV terhadap kondisi ideal.
GHI	Global Horizontal Irradiance - Intensitas radiasi matahari yang diterima permukaan horizontal.
SFC	Specific Fuel Consumption - Konsumsi bahan bakar spesifik per satuan energi yang dihasilkan.
EF	Emission Factor - Faktor emisi karbon per satuan bahan bakar.
CO_2	Carbon Dioxide - Gas rumah kaca hasil pembakaran bahan bakar fosil.
AC	Alternating Current - Arus listrik bolak-balik.
DC	Direct Current - Arus listrik searah.
MW	Megawatt - Satuan daya listrik
MWh	Megawatt-hour - Satuan energi listrik
kWp	Kilowatt-peak - Kapasitas maksimum sistem PV pada kondisi standar.
RE	Renewable Energy - Energi terbarukan.
RUPTL	Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik - Dokumen perencanaan sistem kelistrikan PLN.