UNIVERSITAS GADJAH MADA
Optimasi Kapasitas Sistem PLTS-BESS Berbasis Model Degradasi Baterai untuk Pemenuhan Beban Puncak
Malam: Studi Kasus Guluk-Guluk, Madura
Herdian Raditya, Dr. Ir. Rachmawan Budiarto S.T., M.T., IPU.; Ir. Roni Irnawan S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN ..... **i**
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI ii
PRAKATA iii
DAFTAR ISI v
DAFTAR TABEL viii
DAFTAR GAMBAR ix
INTISARI x
ABSTRACT xi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan dan Batasan Masalah 11
1.3 Keaslian Penelitian 13
1.4 Tujuan Penelitian 15
I.5 Manfaat Penelitian 15
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 17
2.1 Tinjauan Pustaka 17
2.1.1 Klaster 1: Literatur tentang Optimasi *Sizing* PV-BESS 26
2.1.2 Klaster 2: Literatur tentang Degradasi Baterai 28
2.1.3 Klaster 3: Literatur tentang Simulasi *Time-series* dan *Sizing–Operation* 30
2.1.4 Klaster 4: Literatur tentang Konfigurasi Sistem dan Konteks Aplikasi 31
2.1.5 Sintesis *Research Gap* dan *Positioning* Penelitian 33
2.2 Landasan Teori Sistem PV-BESS 36
2.2.1 Sistem PV-BESS untuk Layanan *Peaker* 36
2.2.2 Model Energi PLTS dan Pendekatan *Peak Sun Hour* (PSH) 37
2.2.3 Pemodelan Konseptual BESS: SoC, *Deliverable Energy*, dan *Adequacy* 39
2.2.4 Degradasi pada *Battery Energy Storage System* (BESS) 40
2.2.5 Model Operasi Battery Energy Storage System (BESS) 42
2.2.6 Konsep Layanan Beban Puncak dan Peran PV–BESS sebagai *Peaker* 44
2.2.7 Indikator Kinerja dan Evaluasi Kecukupan Sistem PV–BESS 45
2.2.8 Metode Optimasi Kapasitas Sistem PV–BESS 47
2.2.9 Dasar Teori *Particle Swarm Optimization* 50
2.3 Pertanyaan Penelitian 53
2.4 Hipotesis 53
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 55
3.1 Desain dan Pendekatan Penelitian 55
3.2 Alur dan Tahapan Penelitian 56

Optimasi Kapasitas Sistem PLTS-BESS Berbasis Model Degradasi Baterai untuk Pemenuhan Beban Puncak
Malam: Studi Kasus Guluk-Guluk, Madura
Herdian Raditya, Dr. Ir. Rachmawan Budiarto S.T., M.T., IPU.; Ir. Roni Irnawan S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.3 Lokasi Studi, Data dan Asumsi Penelitian 59
3.3.1 Lokasi Studi dan Konteks Sistem 59
3.3.2 Data Iklim dan Sumber Data Penelitian 60
3.3.3 Profil Beban dan Target Layanan Sistem 60
3.3.4 Konfigurasi Operasi Sistem PV–BESS 61
3.3.5 Parameter Teknis PLTS 62
3.3.6 Parameter Teknis BESS 63
3.3.7 Parameter Ekonomi dan Finansial Sistem 65
3.4 Model Simulasi Operasi Sistem PV-BESS 67
3.4.1 Horizon Simulasi 67
3.4.2 Model Produksi Energi PLTS 68
3.4.3 Mekanisme Operasi *PV–Only Charging* BESS 69
3.5 Model Degradasi Baterai dan Aturan *Replacement* 73
3.5.1 Mekanisme Degradasi Baterai 74
3.5.2 Estimasi *Equivalent Full Cycle* dan Kapasitas Efektif Baterai 75
3.5.3 Representasi *Cohort* Baterai 76
3.5.4 Kriteria *Service-Based Replacement* dan Strategi REPEX 77
3.6 Optimasi Kapasitas Sistem Menggunakan *Particle Swarm Optimization* 81
3.6.1 Representasi Variabel Keputusan dan Ruang Pencarian 81
3.6.2 Fungsi Objektif Optimasi 82
3.6.3 Integrasi PSO dengan Model Simulasi 84
3.6.4 Prosedur Implementasi PSO 84
3.6.5 Parameter PSO yang Digunakan 85
3.7 Metode Evaluasi dan Analisis Lanjutan 86
3.7.1 Verifikasi Sensitivitas Solusi Optimasi 86
3.7.2 Analisis *Trade-Off* Biaya (NPC) dan Keandalan 87
3.7.3 Evaluasi *Robustness* terhadap Degradasi dan Kebutuhan REPEX 87
3.7.4 Analisis Sensitivitas Kapasitas PCS 88
3.7.5 *Re-Optimization* pada Variasi Kapasitas PCS 88
BAB IV HASIL PENELITIAN 90
4.1 Karakterisasi Data *Input* dan Potensi Energi Surya di Lokasi Studi 90
4.1.1 Sumber Data dan Spesifikasi Lokasi Studi 90
4.1.2 Parameter *Peak Sun Hour* sebagai Acuan Formulasi Energi Produksi PLTS 91
4.1.3 Pengolahan Data Iradiansi menjadi PSH 91
4.1.4 Perhitungan Ambang Kecukupan Energi Harian 92
4.1.5 Distribusi Probabilistik PSH 93
4.1.6 Variabilitas Antar Tahun dan Potensi Risiko Akumulatif Terhadap EFPCH 95

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Optimasi Kapasitas Sistem PLTS-BESS Berbasis Model Degradasi Baterai untuk Pemenuhan Beban Puncak
Malam: Studi Kasus Guluk-Guluk, Madura
Herdian Raditya, Dr. Ir. Rachmawan Budiarto S.T., M.T., IPU.; Ir. Roni Irnawan S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.1.7 Pola Musiman dan *Window* Risiko Energi 96
4.1.8 Sintesis dan Implikasi terhadap Pemodelan Sistem 98
4.2 Simulasi *Time-series* 25 Tahun 100
4.2.1 Pembentukan Horizon Simulasi *Time-series* 25 Tahun 100
4.2.2 Profil PSH pada Horizon 25 Tahun 100
4.2.3 Konfigurasi *Baseline* Sistem dan Asumsi Operasional 102
4.2.4 Mekanisme Simulasi *Time-series* 103
4.2.5 Hasil Simulasi Awal dan Implikasi terhadap kebutuhan optimasi 103
4.3 Optimasi Kapasitas PV-BESS menggunakan *Particle Swarm Optimization* 104
4.3.1 Kerangka dan Tujuan Optimasi Kapasitas PV-BESS 104
4.3.2 Hasil Optimasi PSO Skema *Ful Replacement* 105
4.3.3 Hasil Optimasi PSO Skema *Partial Augmentation* 108
4.3.4 Identifikasi *Constraint* Transfer Energi pada PCS 50 MW 110
4.4 Verifikasi Sensitivitas dan Validasi Solusi PSO 111
4.4.1 Visualisasi Global Permukaan *Fitness* (*Coarse Grid*) 111
4.4.2 Verifikasi Minimum Lokal Menggunakan *Fine Grid* 112
4.4.3 Analisis Sensitivitas Satu Dimensi (1D *Slices*) 113
4.4.4 Sintesis Hasil Sensitivitas 115
4.5 *Trade-off Net Present Cost* terhadap *Reliability* dan Batas Operasional Sistem 115
4.5.1 Metodologi Penyusunan *Pareto Frontier* dan Definisi Metrik Evaluasi 116
4.5.2 Analisis Pareto Frontier: *Trade-Off* NPC dan *Reliability* 118
4.5.3 Analisis Kuantitatif *Marginal Cost* dan Struktur Frontier 120
4.6 Evaluasi Degradasi BESS dan Kebutuhan REPEX 123
4.6.1 Justifikasi Asumsi Laju Degradasi BESS 123
4.6.2 Evolusi SOH dan *Crossing Warranty Threshold* (SOH 80%) 124
4.6.3 Evaluasi *Deliverable Energy* dan Kebutuhan REPEX 124
4.6.4 Analisis *Driver Reliability*: Variabilitas PSH sebagai Faktor Dominan 125
4.6.5 Implikasi Desain dan Simpulan 126
4.7 Sensitivitas Reliabilitas terhadap Daya PCS *Charging* 126
4.8 Re-Optimasi Kapasitas PV–BESS pada Variasi Skenario Daya PCS *Charging* 129
4.9 Sintesis Hasil Penelitian 138
4.10 Implikasi Hasil terhadap Perencanaan RUPTL dan Model Bisnis PLTS-BESS 139
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 141
5.1 Kesimpulan 141
5.2 Saran 142
DAFTAR PUSTAKA 145

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Kapasitas Sistem PLTS-BESS Berbasis Model Degradasi Baterai untuk Pemenuhan Beban Puncak
Malam: Studi Kasus Guluk-Guluk, Madura
Herdian Raditya, Dr. Ir. Rachmawan Budiarto S.T., M.T., IPU.; Ir. Roni Irnawan S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Ringkasan Beban Puncak Tertinggi Subsistem Madura Tahun 2022–2023 2

Tabel 2. 1 Penjelasan Dimensi Analisis Tinjauan Pustaka 18
Tabel 2. 2. Matriks Evaluasi terhadap 6 Dimensi Analisis Literatur PV-BESS. 22
Tabel 2. 3 Komparasi Metode Optimasi untuk Penentuan Kapasitas Sistem PV–BESS..... 48

Tabel 3. 1 Parameter Teknis PLTS 63
Tabel 3. 2 Asumsi Parameter Teknis BESS..... 64
Tabel 3. 3 Asumsi Parameter Ekonomi dan Finansial Sistem PV-BESS 66
Tabel 3. 4 Strategi Penggantian Kapasitas Baterai. 79
Tabel 3. 5 Parameter PSO yang digunakan dalam Simulasi 85

Tabel 4. 1 Cuplikan Data Iradiansi Guluk-Guluk Madura (Sumber: NASAPOWER)..... 90
Tabel 4. 2 Pengolahan Data *Peak Sun Hour* (2015-2024) 92
Tabel 4. 3 Uraian *Net Present Cost* (NPC) atas Hasil Optimasi PSO..... 108
Tabel 4. 4 Perbandingan *Full Replacement Mode* dan *Partial Augmentation Mode*..... 108
Tabel 4. 5 Minimum NPC untuk Target *Reliability* (No-REPEX) 121
Tabel 4. 6 *Marginal Cost* antar level *Reliability*. 121
Tabel 4. 7 Perubahan *Reliability* atas simulasi sensitivitas PCS..... 127
Tabel 4. 8 Hasil Simulasi PSO atas Simulasi Perubahan Kapasitas PCS 130
Tabel 4. 9 Hubungan antara NPC dan *Reliability* atas Konfigurasi PCS..... 133
Tabel 4. 10 Uraian *Marginal Reliability Gain* per peningkatan NPC..... 136
Tabel 4. 11 Uraian penurunan *penalty* per peningkatan NPC dari perubahan PCS. 136

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Kapasitas Sistem PLTS-BESS Berbasis Model Degradasi Baterai untuk Pemenuhan Beban Puncak
Malam: Studi Kasus Guluk-Guluk, Madura
Herdian Raditya, Dr. Ir. Rachmawan Budiarto S.T., M.T., IPU.; Ir. Roni Irnawan S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Sistem Kelistrikan Madura Eksisting 2
Gambar 1. 2 Pola Maksimum Beban Siang dan Maksimum Beban Malam Subsistem Madura Tahun 2023 3
Gambar 1. 3 Profil Beban Harian Subsistem Madura pada 22 November 2023 4

Gambar 3. 1 Alur dan Tahapan Penelitian 58
Gambar 3. 2 Konfigurasi Sistem PV-BESS dengan Skema *PV-Only Charging* 62

Gambar 4. 1 Pola *Peak Sun Hour* harian selama periode 2015-2024 92
Gambar 4. 2 Distribusi *Peak Sun Hour* Harian selama periode 2015-2024 94
Gambar 4. 3 Sebaran Jumlah Hari dengan PSH rendah periode 2015-2024 95
Gambar 4. 4 Profil Rerata PSH Bulanan terhadap *Threshold Charging* 96
Gambar 4. 5 *Heatmap* PSH Bulanan (Rerata Harian) Periode 2015-2024 97
Gambar 4. 6 Profil PSH Horizon 25 Tahun 100
Gambar 4. 7 Heatmap Rerata PSH Bulanan (Horizon 25 Tahun) 101
Gambar 4. 8 Profil Rerata PSH bulanan terhadap EFPCH 102
Gambar 4. 9 Profil Energi Keluaran Harian terhadap Target *Peaker* 104
Gambar 4. 10 Konvergensi PSO Skema *Full Replacement* BESS 106
Gambar 4. 11 Konvergensi Iterasi PSO pada *Partial Augmentation* 109
Gambar 4. 12 Profil Produksi Energi PV dan Energi yang diserap BESS 110
Gambar 4. 13 Hasil simulasi *coarse fitness* 112
Gambar 4. 14 Pemetaan *Fine-grid fitness contour* di sekitar titik optimum PSO 113
Gambar 4. 15 Irisan 1D: *Fitness* vs Kapasitas BESS (PV tetap 75,36 MWp) 114
Gambar 4. 16 Irisan 1D: *Fitness* vs Kapasitas PV (BESS tetap 570,98 MWh) 114
Gambar 4. 17 *Trade-off* antara NPC dan *Reliability* serta posisi hasil PSO 118
Gambar 4. 18 Profil SOH BESS dan *Annual Unmet energy* sepanjang *lifetime* 124
Gambar 4. 19 *Deliverable Energy* tahunan sepanjang *lifetime* 125
Gambar 4. 20 Korelasi antara *annual unmet energy* dan *Low* PSH 125
Gambar 4. 21 Sensitivitas *Reliability* terhadap PCS *Charging Power* 127
Gambar 4. 22 Konvergensi hasil PSO ketika PCS sebesar 60 MW 130
Gambar 4. 23 Hasil re-optimasi atas perubahan PCS 132
Gambar 4. 24 Hubungan NPC–*Reliability* atas perubahan PCS 133
Gambar 4. 25 Dekomposisi *fitness* (NPC and *unmet energy penalty*) pada setiap PCS 134
Gambar 4. 26 Komposisi *fitness* atas hasil PSO dari variasi PCS 135
Gambar 4. 27 Grafik *Waterfall* penurunan *fitness* atas perubahan PCS 135