

SKRIPSI

**SIMULASI UNTUK OPTIMASI PARAMETRIK DESAIN
SISTEM COMPRESSED AIR – GRAVITY ENERGY STORAGE**



Intelligentia - Dignitas

DISUSUN OLEH:

INDRIANTO DICKY ISMAWAN

1520620032

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA

2025

SIMULASI UNTUK OPTIMASI PARAMETRIK DESAIN SISTEM COMPRESSED AIR – GRAVITY ENERGY STORAGE

Indrianto Dicky Ismawan

Dosen Pembimbing: Dr. Ir. Ragil Sukarno, M.T. dan Ahmad Kholil, S.T.,
M.T.

ABSTRAK

Potensi energi terbarukan di Indonesia mencapai 3.686 GW, namun pemanfaatannya baru sebesar 12,3% dari total konsumsi energi. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan sistem *Compressed Air-Gravity Energy Storage* (CA-GES) yang lebih ramah lingkungan sebagai alternatif penyimpanan energi baterai berskala besar. Variabel yang dianalisis meliputi diameter piston, tinggi silinder, tinggi piston, massa jenis piston, volume bejana tekan, dan diameter pipa. Studi optimasi parametrik dilakukan dengan menggunakan model matematis yang diintegrasikan dengan Microsoft Excel dan *Virtual Basic for Applications* (VBA) untuk menghitung energi total sistem CA-GES. Metode Taguchi dan Analysis of Variance (ANOVA) digunakan untuk menganalisis signifikansi dan kontribusi parameter desain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa diameter piston memberikan pengaruh paling signifikan terhadap energi total sistem dengan nilai *P-value* 0,009, diikuti oleh tinggi silinder dengan nilai *P-value* 0,036. Diameter piston memberikan kontribusi terbesar sebesar 52,35%, sedangkan tinggi silinder berkontribusi sebesar 24,49%, kemudian massa jenis piston memberikan kontribusi sebesar 2,5%. Sementara itu, tinggi piston dan volume bejana tekan memberikan kontribusi negatif masing-masing sebesar 6,38% dan 11,12%. Konfigurasi optimal untuk memaksimalkan energi total adalah diameter piston 0,3 m, tinggi silinder 3 m, tinggi piston 0,045 m, massa jenis piston 7850 kg/m³, dan volume bejana tekan 0,005 m³. Dengan demikian, penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan awal dalam mendesain sistem CA-GES.

Kata kunci: energi terbarukan, penyimpanan energi, konversi energi

SIMULATION FOR PARAMETRIC OPTIMIZATION DESIGN OF A COMPRESSED AIR – GRAVITY ENERGY STORAGE SYSTEM

Indrianto Dicky Ismawan

Advisory Lecturer: Dr. Ir. Ragil Sukarno, M.T. and Ahmad Kholil, S.T., M.T.

ABSTRACT

The potential for renewable energy in Indonesia reaches 3,686 GW, yet its utilization is only 12.3% of total energy consumption. This study aims to optimize a more environmentally friendly Compressed Air-Gravity Energy Storage (CA-GES) system as an alternative to large-scale battery energy storage. The analyzed variables include piston diameter, cylinder height, piston height, piston density, pressure vessel volume, and pipe diameter. Parametric optimization was conducted using a mathematical model integrated with Microsoft Excel and Virtual Basic for Applications (VBA) to calculate the total energy of the CA-GES system. The Taguchi method and Analysis of Variance (ANOVA) were used to analyze the significance and contribution of the design parameters. The results show that the piston diameter has the most significant influence on the system's total energy with a P-value of 0.009, followed by the cylinder height with a P-value of 0.036. The piston diameter contributes the most at 52.35%, while the cylinder height contributes 24.49%, and the piston density contributes 2.5%. Meanwhile, the piston height and pressure vessel volume provide negative contributions of 6.38% and 11.12%, respectively. The optimal configuration to maximize total energy is a piston diameter of 0.3 m, cylinder height of 3 m, piston height of 0.045 m, piston density of 7850 kg/m³, and pressure vessel volume of 0.005 m³. Thus, this study can serve as an initial reference for designing a CA-GES system.

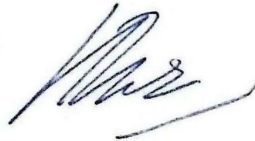
Keywords: renewable energy, energy storage, energy conversion.

LEMBAR PENGESAHAN UJIAN SKRIPSI

Judul : Simulasi Untuk Optimasi Parametrik Desain Sistem
Compressed Air - Gravity Energy Storage
Penyusun : Indrianto Dicky Ismawan
NIM : 1520620032

Disetujui oleh:

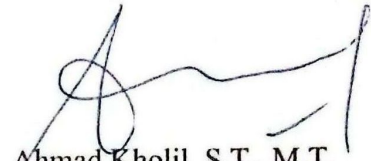
Pembimbing I,



Dr. Ir. Ragil Sukarno, M.T.

NIP. 197911022012121001

Pembimbing II,



Ahmad Kholil, S.T., M.T.

NIP. 197908312005011001

Mengetahui,

Koordinator Program Studi
Teknik Mesin



Dr. Ir. Ragil Sukarno, M.T.

NIP. 197911022012121001

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

Judul : Simulasi Untuk Optimasi Parametrik Desain Sistem
Compressed Air - Gravity Energy Storage
Penyusun : Indrianto Dicky Ismawan
NIM : 1520620032
Tanggal Ujian : 24 Januari 2025

Disetujui oleh:

Pembimbing I,



Dr. Ir. Ragil Sukarno, M.T.

NIP. 197911022012121001

Pembimbing II,

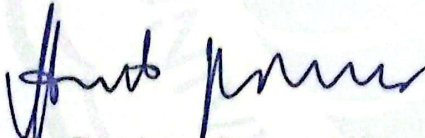


Ahmad Kholil, S.T., M.T.

NIP. 197908312005011001

Pengesahan Panitia Ujian Skripsi:

Ketua Penguji



Dr. Eng. Agung Premono, M.T.

NIP. 197705012001121002

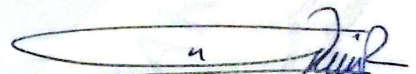
Anggota Penguji I,



Dr. Imam Basori, M.T.

NIP. 197906072008121003

Anggota Penguji II,




Dr. Darwin Rio Budi Syaka, M.T.

NIP. 197604222006041001

Mengetahui,

Koordinator Program Studi Teknik Mesin



Dr. Ir. Ragil Sukarno, M.T.

NIP. 197911022012121001

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini merupakan karya asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik sarjana, baik di Universitas Negeri Jakarta maupun di Perguruan Tinggi lain.
2. Skripsi ini belum dipublikasikan, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
3. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidak benaran, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di Universitas Negeri Jakarta.

Jakarta, 24 Januari 2025

Yang membuat pernyataan



Indrianto Dicky Ismawan

NIM. 1520620032



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
UPT PERPUSTAKAAN

Jalan Rawamangun Muka Jakarta 13220
Telepon/Faksimili: 021-4894221
Laman: lib.unj.ac.id

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Negeri Jakarta, yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : Indrianto Dicky Ismawan
NIM : 1520620032
Fakultas/Prodi : Teknik Mesin
Alamat email : Indrianto.Dicky26@gmail.com

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada UPT Perpustakaan Universitas Negeri Jakarta, Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah:

Skripsi Tesis Disertasi Lain-lain (.....)

yang berjudul :

SIMULASI UNTUK OPTIMASI PARAMETRIK DESAIN COMPRESSED AIR - GRAVITY
ENERGY STORAGE

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini UPT Perpustakaan Universitas Negeri Jakarta berhak menyimpan, mengalihmediakan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di internet atau media lain secara *fulltext* untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan atau penerbit yang bersangkutan.

Saya bersedia untuk menanggung secara pribadi, tanpa melibatkan pihak Perpustakaan Universitas Negeri Jakarta, segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah saya ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta 14 Februari 2025

Penulis

(Indrianto Dicky Ismawan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Simulasi untuk Optimasi Parametrik Desain Sistem Compressed Air – Gravity Energy Storage”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta.

Proses penyusunan skripsi ini tidak lepas dari berbagai tantangan dan hambatan. Namun, berkat dukungan, bimbingan, dan bantuan dari banyak pihak, penulis dapat menyelesaikannya dengan baik. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

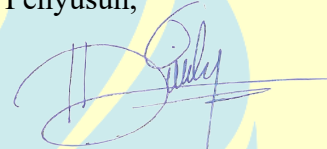
1. Bapak Dr. Ragil Sukarno, M.T., selaku dosen pembimbing 1 dan koordinator program studi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta atas kesediannya dalam memberikan arahan, bimbingan, dan motivasi dalam melaksanakan penelitian dan penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Ahmad Kholil S.T., M.T., selaku dosen pembimbing 2 yang telah bersedia meluangkan waktu dan kesediannya memberikan arahan, bimbingan, dan dorongan semangat dalam melaksanakan penelitian dan penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Eng. Agung Premono, M.T., Bapak Dr. Imam Basori, M.T., dan Bapak Dr. Darwin Rio Budi Syaka, M.T. yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan dan menguji skripsi penulis.
4. Bapak Boin, Bapak Sumardi, Bapak Minadi, Bapak Dani dan Bapak Dayat selaku teknisi laboratorium otomotif, produksi, dan material atas bantuan dan dukungannya sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian dengan baik.
5. Seluruh Dosen dan Staf Administrasi Program Studi S1 Teknik Mesin yang telah memberi ilmu dan membantu penulis selama berkuliah di Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta.
6. Kedua orang tua penulis, yang memberi segala dorongan moral maupun material sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dan berjuang meraih mimpi.

7. Eldi Saputra dan Astama Lalang Fawwaz atas kebersamaan, diskusi, dukungan, dan semangat berjuang yang tak ternilai selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini.
8. Teman-teman Program Studi S1 Teknik Mesin senantiasa memberi semangat, dukungan, dan kebersamaan selama penulis menempuh studi di Universitas Negeri Jakarta.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun. Penulis berharap, skripsi ini dapat memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya di bidang teknik mesin.

Jakarta, 24 Januari 2025

Penyusun,



Indrianto Dicky Ismawan

NIM. 1520620032



DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
LEMBAR PENGESAHAN UJIAN SKRIPSI	iv
HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI.....	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Identifikasi Masalah	7
1.3 Pembatasan Masalah	8
1.4 Perumusan Masalah.....	8
1.5 Tujuan Penelitian.....	9
1.6 Manfaat Penelitian.....	9
BAB II KAJIAN TEORETIK.....	10
2.1 Klasifikasi Penyimpanan Energi	10
2.1.1 <i>Battery Energy Storage (BES)</i>	10
2.1.2 <i>Pumped Hydroelectric Energy Storage (PHES)</i>	11
2.1.3 <i>Compressed Air Energy Storages (CAES)</i>	12
2.1.4 <i>Gravity Energy Storages (GES)</i>	13
2.1.5 Perbandingan Teknologi Penyimpanan Energi	14
2.2 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	15
2.3 Aliran Fluida.....	16
2.4 Proses Termodinamika	18
2.4.1 Hukum I Termodinamika	18
2.4.2 Hukum II Termodinamika.....	18
2.4.3 Hukum Gas Ideal.....	19
2.4.4 Rasio Kapasitas Kalor	19
2.4.5 Proses Polytropic.....	20
2.5 Desain Eksperimen (DoE).....	23

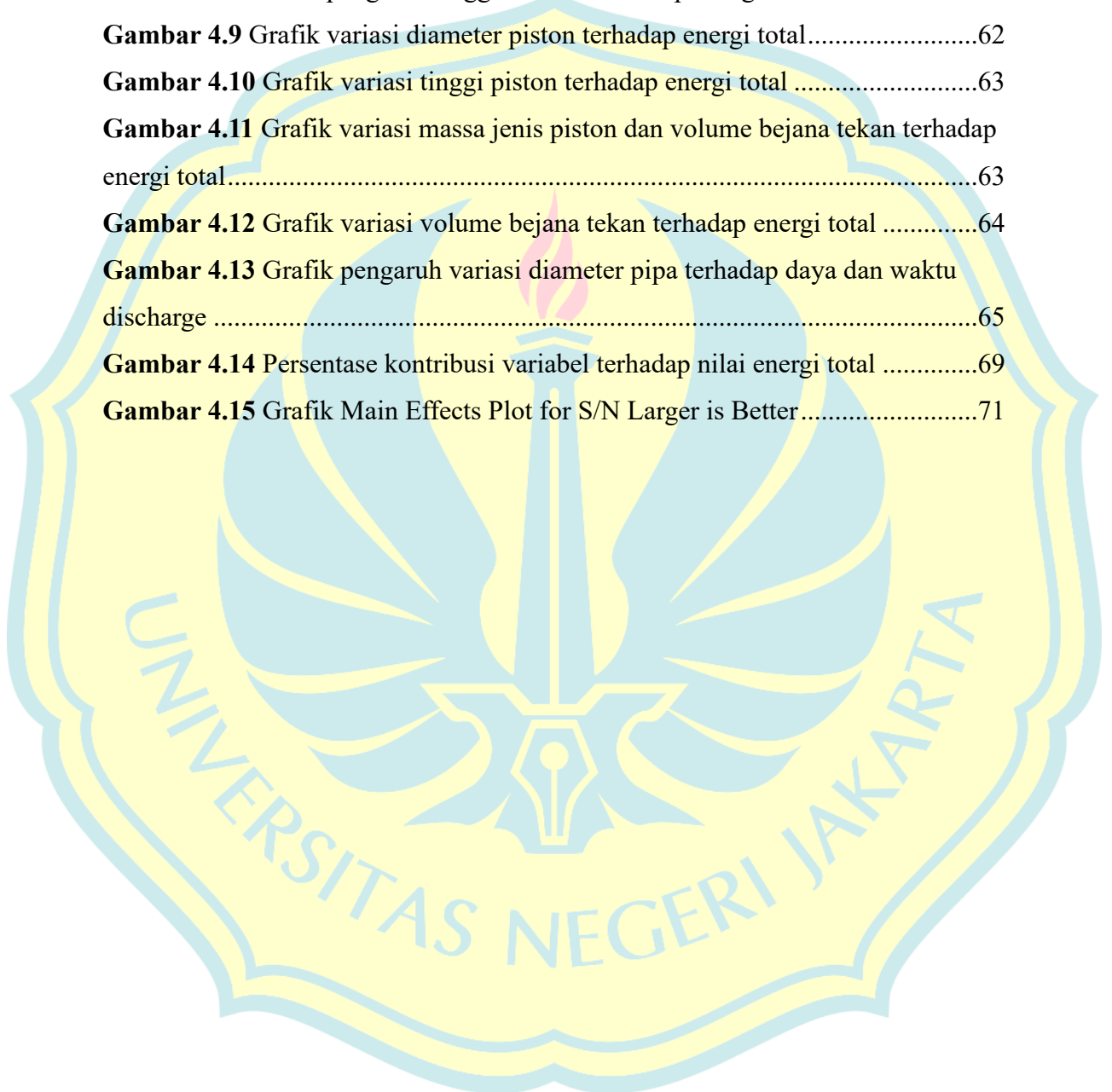
2.6	Metode Taguchi	25
2.7	Orthogonal Array	26
2.8	Karakteristik Kualitas	27
2.8.1	Nominal is best.....	28
2.8.2	Smaller is better.....	28
2.8.3	Larger is better	28
2.9	Analisis Variansi	29
2.9.1	Degree of freedom.....	29
2.9.2	Variansi.....	29
2.9.3	Uji F	30
2.9.4	Tabel ANOVA	30
2.10	Hasil Penelitian yang Relevan	31
2.11	Kerangka Berpikir.....	33
BAB III METODE PENELITIAN		34
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	34
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	34
3.3	Diagram Alir Penelitian.....	35
3.4	Prinsip Kerja <i>Compressed Air-Gravity Energy Storage (CA-GES)</i>	36
3.5	Model Matematika <i>Compressed Air Gravity Energy Storage</i>	38
3.5.1	Proses Kompresi dan Ekspansi	38
3.5.2	Energi total yang dihasilkan.....	39
3.6	Validasi Model.....	42
3.7	Teknik dan Prosedur Pengumpulan Data	43
3.8	Penentuan Parameter Dasar	44
3.8.1	Dimensi Komponen	44
3.8.2	Kondisi Pengisian (<i>Charging</i>).....	47
3.8.3	Kondisi Pengosongan (<i>Discharging</i>)	48
3.8.4	Energi yang dihasilkan	49
3.9	Teknik Analisis Data.....	50
3.9.1	Pembuatan Orthogonal Array Menggunakan Minitab 22	50
3.9.2	ANOVA Menggunakan Minitab 22	51
3.9.3	Analisis Taguchi Menggunakan Minitab 22	53
BAB IV HASIL & PEMBAHASAN		55
4.1	Program Prediksi Parameter	55

4.1.1	Input Pengaturan Parameter Program	56
4.1.2	Output Hasil Perhitungan Program	58
4.2	Parameter Dasar Perhitungan Numerik	60
4.3	Analisis Faktor Tunggal	61
4.3.1	Tinggi Silinder.....	61
4.3.2	Diameter Piston.....	62
4.3.3	Tinggi Piston	63
4.3.4	Massa Jenis Piston	63
4.3.5	Volume Bejana Tekan.....	64
4.3.6	Diameter Pipa Outlet.....	65
4.4	Identifikasi Kontribusi Parameter terhadap Energi Total	66
4.4.1	Penentuan Faktor dan Level Desain Eksperimen	67
4.4.2	Penerapan DoE Orthogonal Array dan ANOVA	67
4.4.3	Analisis Taguchi.....	70
4.5	Identifikasi Porsen Kontribusi Energi Tekanan Udara Dengan Energi Hidrolik	72
4.6	Efisiensi Sistem	73
BAB V PENUTUP		74
5.1	Kesimpulan.....	74
5.2	Saran	74
DAFTAR PUSTAKA.....		75
LAMPIRAN.....		79

DAFTAR GAMBAR

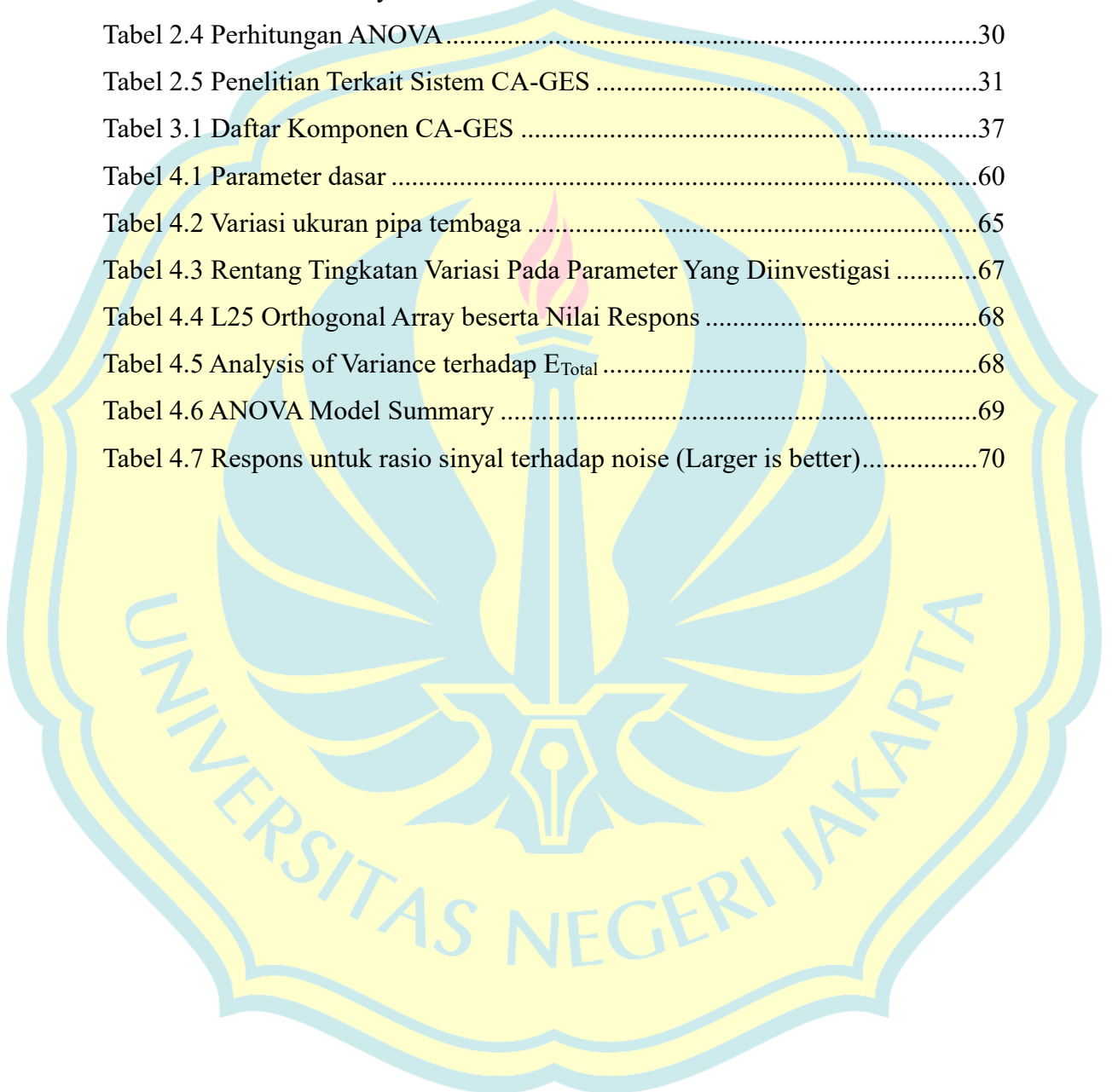
Gambar 2.1 Baterai Litium Ion (sumber: lithiumbatterycompany.com)	11
Gambar 2.2 Tata Letak Sistem PHES [11]	12
Gambar 2.3 Komponen sistem CAES [12]	13
Gambar 2.4 Skematik Sistem GES [30]	14
Gambar 2.5 Pembangkit listrik tenaga surya (sumber: marketeers.com).....	15
Gambar 2.6 Diagram p-v dari proses kompresi isentropik, polytropik, dan isothermal pada batas tekanan yang sama.....	20
Gambar 2.7 Selama proses adiabatik, suatu sistem tidak bertukar panas dengan lingkungannya [32].	22
Gambar 2.8 Kerangka berpikir	33
Gambar 3.1 DoE: Factorial Array (kiri) Orthogonal Array (kanan).....	23
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian	35
Gambar 3.3 Skematik sistem CA-GES.....	36
Gambar 3.4 Ilustrasi prototipe sistem CA-GES	37
Gambar 3.5 Kondisi tekanan dan volume (1 dan 2).....	39
Gambar 3.6 Pembagian kategori energi udara bertekanan dan energi hidrolik....	41
Gambar 3.7 Pompa elektrik 24W	46
Gambar 3.8 Turbin mikrohidro.....	46
Gambar 3.9 Tampilan menu: Create Taguchi Design.....	50
Gambar 3.10 Tampilan antarmuka Taguchi Design pada Minitab 22	50
Gambar 3.11 Tampilan antarmuka Taguchi Design: Factors pada Minitab 22	51
Gambar 3.12 Tampilan menu ANOVA: Fit General Linear Model.....	51
Gambar 3.13 Tampilan antarmuka General Linear Model	52
Gambar 3.14 Tampilan menu: Analyze Taguchi Design	53
Gambar 3.15 Tampilan antarmuka Analyze Taguchi Design	53
Gambar 3.16 Tampilan antarmuka Analyze Taguchi Design: Options.....	54
Gambar 3.17 Tampilan antarmuka Analyze Taguchi Design: Graphs.....	54
Gambar 4.1 Antarmuka program kalkulasi CA-GES	55
Gambar 4.2 Tampilan antarmuka input parameter awal.....	56
Gambar 4.3 Tampilan antarmuka rasio parameter.....	57

Gambar 4.4 Tampilan antarmuka kolom input energi yang diinginkan	57
Gambar 4.5 Tampilan output dimensi hasil kalkulasi program	58
Gambar 4.6 Tampilan grafik tekanan dan temperatur terhadap posisi piston	59
Gambar 4.7 Tampilan waktu pengisian dan pengosongan terhadap posisi piston	60
Gambar 4.8 Grafik pengaruh tinggi silinder terhadap energi total	61
Gambar 4.9 Grafik variasi diameter piston terhadap energi total	62
Gambar 4.10 Grafik variasi tinggi piston terhadap energi total	63
Gambar 4.11 Grafik variasi massa jenis piston dan volume bejana tekan terhadap energi total	63
Gambar 4.12 Grafik variasi volume bejana tekan terhadap energi total	64
Gambar 4.13 Grafik pengaruh variasi diameter pipa terhadap daya dan waktu discharge	65
Gambar 4.14 Persentase kontribusi variabel terhadap nilai energi total	69
Gambar 4.15 Grafik Main Effects Plot for S/N Larger is Better	71



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Teknik DoE.....	24
Tabel 2.2 Perbandingan Desain Full Factorial dan Desain Taguchi [39].....	25
Tabel 2.3 Pemilihan Array.....	27
Tabel 2.4 Perhitungan ANOVA.....	30
Tabel 2.5 Penelitian Terkait Sistem CA-GES	31
Tabel 3.1 Daftar Komponen CA-GES	37
Tabel 4.1 Parameter dasar	60
Tabel 4.2 Variasi ukuran pipa tembaga	65
Tabel 4.3 Rentang Tingkatan Variasi Pada Parameter Yang Diinvestigasi	67
Tabel 4.4 L25 Orthogonal Array beserta Nilai Respons	68
Tabel 4.5 Analysis of Variance terhadap E_{Total}	68
Tabel 4.6 ANOVA Model Summary	69
Tabel 4.7 Respons untuk rasio sinyal terhadap noise (Larger is better).....	70



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel data hasil perhitungan variasi level faktor	79
Lampiran 2. Hasil Orthogonal Array L25	80
Lampiran 3. Worksheet hasil ANOVA pada minitab software.....	81
Lampiran 4. Worksheet hasil analisa taguchi pada minitab software	82

