

**DESAIN DAN ANALISIS KELAYAKAN TEKNO-EKONOMI
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS)
TERAPUNG DI WADUK WONOGIRI, JAWA TENGAH**

TESIS

**Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik dari
Universitas Darma Persada**

**Oleh
FAISAL KASANOFA
NIM : 2022910003**

(Program Studi Magister Teknik Energi Terbarukan)

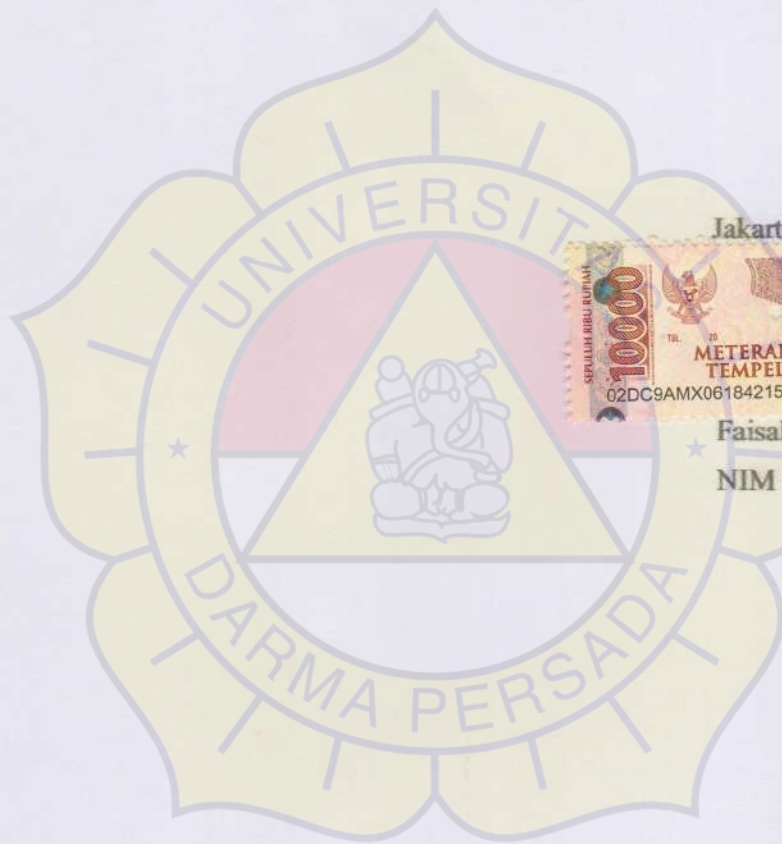


**SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS DARMA PERSADA
JAKARTA**

2024

PERNYATAAN KEASLIAN

"Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis ini merupakan hasil karya sendiri dan sepanjang pengetahuan dan keyakinan saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan-bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagian bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijasah pada Universitas Darma Persada atau Perguruan tinggi lainnya"



Jakarta, Juli 2024



Faisal Kasanofa

NIM : 2022910003

ABSTRAK

FAISAL KASANOFA (2022910003). Desain dan Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terapung di Waduk Wonogiri, Jawa Tengah. Di bawah bimbingan, Dr, Andy Tirta, M.Eng, Dr. Eng Aep Saepul Uyun, S.Tp. M.Eng , Dr. Muswar Muslim, M.Eng.

PLTS Terapung dengan memanfaatkan badan air merupakan teknologi baru dalam menghasilkan tenaga listrik dari energi matahari. Selain memberikan solusi keterbatasan lahan untuk PLTS skala besar, biaya investasi pengadaan lahan dapat ditekan sehingga tarif listrik lebih kompetitif. Di Indonesia, potensi teknis PLTS Terapung sekitar 4,8 GW dengan 27 lokasi badan air yang telah dilengkapi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan infrastruktur kelistrikan yang sudah ada. Salah satunya waduk Wonogiri di Jawa Tengah yang direncanakan dengan kapasitas 100 MW seperti yang tercantum dalam RUPTL 2021-2030. Studi ini menggunakan metode kuantitatif dengan pengumpulan data numerik, studi literatur dan simulasi menggunakan perangkat lunak *PVsyst*.

Terdapat dua area potensial untuk penempatan FPV seluas 458 ha, setara 6,5% genangan waduk saat tinggi muka air normal setelah mempertimbangkan kedalaman, pola operasi waduk dan kondisi lingkungan sekitar. Sebanyak 24 pulau surya yang terdiri dari dua jenis (6 MWp & 12 MWp) dengan total kapasitas sekitar 254,8 – 259,5 MWp dengan konfigurasi pengapung *two-in a row*, orientasi pemasangan modul surya secara *landscape*, sudut kemiringan panel 7° dan orientasi arah (azimuth) 0°. Simulasi menggunakan *PVsyst* dengan konfigurasi dua jenis modul surya berefisiensi tinggi jenis monokristalin *bifacial* yaitu 650 dan 700Wp dan dua jenis inverter kapasitas 1100 kW_{AC} dan 4400 kW_{AC} telah dilakukan dan didapatkan produksi pembangkitan listrik pada tahun pertama 410,7– 418,1 GWh, faktor kapasitas (CF) 18,1 – 18,8 % dan efisiensi pembangkitan pembangkit sekitar 81,1 – 84,1%. Berdasarkan analisis ekonomi diperoleh biaya nilai siklus hidup (LCC) \$195,3 – 198,3 juta USD, biaya energi rata-rata (LCoE) 5,13 – 6,61 cUSD/kWh. Skenario harga jual listrik dengan margin 5% memberikan hasil NPV positif \$29,1 – 31,7 juta USD; nilai IRR 8,3 – 8,5% diatas suku bunga 6,25% ; nilai *profitability index* 1,1 – 1,2 dan pengembalian/ *payback period* 11,4 – 11,5 tahun lebih pendek dari umur proyek selama 25 tahun. Dengan demikian, pengembangan PLTS Terapung di waduk Wonogiri oleh badan usaha layak untuk direalisasikan dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi

Kata Kunci: PLTS Terapung, desain, simulasi , *PVsyst*, LCC, LCoE , kelayakan finansial.

ABSTRACT

FAISAL KASANOFA (2022910003). Floating Solar Power Plant (FPV) Design and Techno-economic Feasibility Analysis in Wonogiri Reservoir, Central Java. Under direction Dr, Andy Tirta, M.Eng, Dr. Eng Aep Saepul Uyun, S.Tp. M.Eng, Dr. Muswar Muslim, M.Eng.

Floating Solar Power Plants that utilize water bodies are an innovative technology for harnessing solar energy to generate electricity. In addition to providing a solution to land limitations for large-scale solar power plants, land acquisition investment costs can be reduced to make electricity tariffs more competitive. The technical potential is around 4.8 GW in 27 locations of water bodies that have hydropower plants (PLTA) and electricity infrastructure. The Wonogiri reservoir in Central Java is projected to possess a capacity of 100 MW, as shown in the 2021-2030 RUPTL. The study employs a quantitative method involving numerical data collecting, literature review, and modeling utilizing PVsyst software.

After considering the depth, reservoir operation pattern and surrounding environmental conditions, there are two potential areas for FPV placement covering 458 ha, equivalent to 6.5% of the reservoir inundation at average water level. A total of 24 solar islands consisting of 2 types (6 MWp & 12 MWp) with a total capacity of approximately 254.8 - 259.5 MWp with a two-in-a-row float configuration, landscape orientation of solar modules, 7° tilt angle and 0° azimuth. Simulations using PVsyst with a configuration of two types of high-efficiency solar modules of bifacial monocrystalline type, namely 650 and 700Wp and two types of inverters of 1100 kWAC and 4400 kWAC capacity have been carried out and obtained electricity generation production in the first year of 410.7 - 418.1 GWh, capacity factor (CF) 18.1 - 18.8% and generation efficiency of the plant around 81.1 - 84.1%. Based on the economic analysis, the life cycle value cost (LCC) is \$195.3 - 198.3 million USD, and the levelized cost of energy (LCoE) is 5.13 - 6.61 cUSD/kWh. The electricity selling price scenario with a 5% margin results in a positive NPV of \$29.1 - 31.7 million USD; an IRR value of 8.3 - 8.5% above the interest rate of 6.25%; a profitability index value of 1.1 - 1.2 and a payback period of 11.4 - 11.5 years longer than the project life of 25 years. Hence, the business entity's development of a floating solar power plant in the Wonogiri reservoir is feasible based on technical and economic aspects.

Keywords: floating solar power plant, design, simulation, PVsyst, LCC, LCoE, financial feasibility.

LEMBAR PERSETUJUAN TESIS

Judul Tesis : Desain dan Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi
Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)
Terapung di Waduk Wonogiri, Jawa Tengah.

Nama : Faisal Kasanofa

NIM : 2022910003

Telah disetujui oleh komisi pembimbing dan penguji

Dr. Andy Tirta, M.Eng.
(Ketua/Penguji)

Dr. Eng Aep Saepul Uyun, S.Tp. M.Eng
(Anggota/Penguji)

Dr. Muswar Muslim, M.Eng.
(Anggota/Penguji)

Dr.Ir. As Natio Lasman
(Penguji)

Mengetahui

Ketua Program Studi

Direktur Pascasarjana

(Dr. Aep Saepul Uyun, S.Tp., M.Eng.)

(Dr.Ir. As Natio Lasman)

Tanggal Ujian : 26 Juli 2024

Tanggal Yudisium : 27 Juli 2024

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Desain dan Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terapung di Waduk Wonogiri” ini dengan baik. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister di Program Studi Teknik Energi Terbarukan, Universitas Darma Persada.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak, tesis ini tidak akan terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Andy Tirta, M.Eng, selaku pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, saran, dan motivasi selama proses penyusunan tesis ini.
2. Dr. Aep Saepul Uyun, S.Tp., M.Eng., selaku pembimbing kedua dan Ketua Program Studi Magister Teknik Energi Terbarukan yang telah memberikan masukan dan koreksi yang sangat berharga serta memberikan dukungan moral selama penulis menyelesaikan tesis ini.
3. Seluruh staf pengajar Program Studi Magister Teknik Energi Terbarukan Universitas Darma Persada. yang telah memberikan saran, nasihat, ilmu pengetahuan, dan pengalaman selama ini.
4. Seluruh staf tata usaha Program Studi Teknik Energi Terbarukan, Universitas Darma Persada yang telah membantu dalam proses administrasi.
5. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Energi Terbarukan Universitas Darma Persada yang telah memberikan saran, nasihat, dan motivasi.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan di masa yang akan datang. Penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan dapat menjadi sumbangan yang berharga bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Solok pada tanggal 25 Juni 1985, anak bungsu dari dua bersaudara pasangan (Alm.) H.Bakhtar dan Hj.Aflidarni. Penulis menempuh pendidikan strata satu (S1) di Institut Teknologi Bandung, Jurusan Teknik Sipil (2003-2007). Pada tahun 2022 penulis melanjutkan pendidikan strata dua (S2) di Universitas Darma Persada.

Setelah lulus sarjana, penulis bekerja pada beberapa perusahaan *Engineering, Procurement, and Construction* (EPC) yang bergerak dalam bidang industri minyak, gas dan petrokimia. Penulis pernah tergabung dalam keanggotaan dari beberapa himpunan profesi seperti Profesional Madya Bangunan Gedung dan Profesional Madya Ahli Geoteknik dari Lembaga Pengembangan Jasa Konstruksi Indonesia (LPJK), Persatuan Insyur Indonesia (PII), Ikatan Nasional Tenaga Ahli Konsultan (Intakindo), kualifikasi-3 KITLU dan KITEBT Ikatan Ahli Teknik Ketenagalistrikan Indonesia (IATKI). Saat ini penulis bekerja sebagai *civil-structural engineer* di salah satu perusahaan konsultan sektor ketenagalistrikan.

Dipersembahkan untuk Tuhan, Bangsa dan Almamater



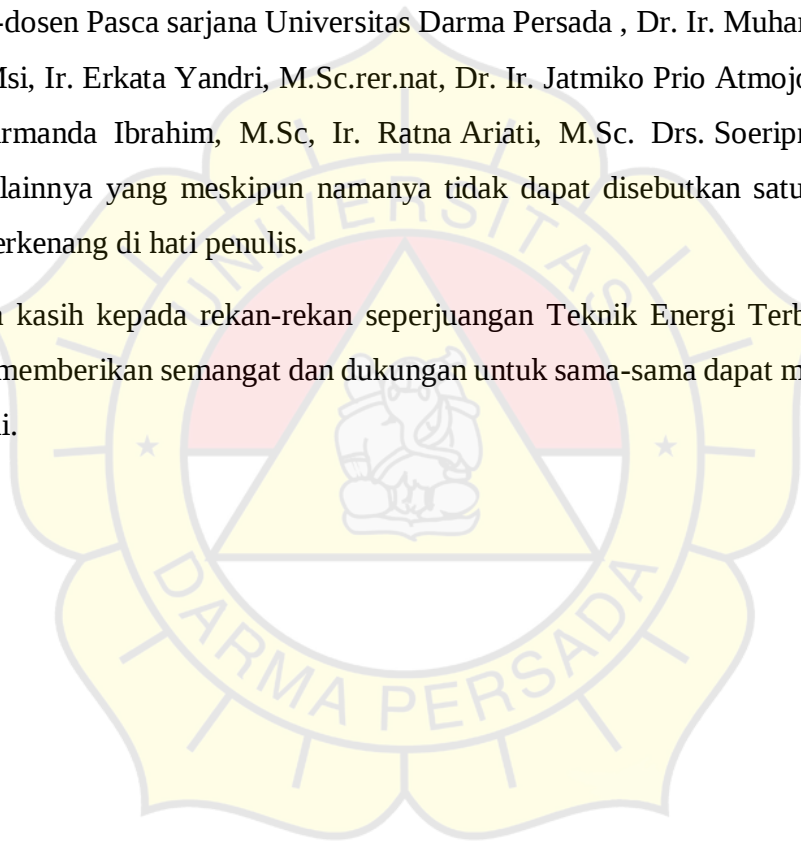
UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterima kasih pada Dr. Andy Tirta, M.Eng, sebagai ketua Tim Pembimbing, atas segala saran, bimbingan dan nasehatnya selama penelitian berlangsung dan selama penulisan tesis ini.

Penulis juga berterima kasih atas saran, kritik dan nasihat dari anggota Tim Pembimbing, dan Penguji Dr. Eng Aep Saepul Uyun, S.Tp. M.Eng, Dr.Muswar Muslim, M.Eng., dan Dr.Ir. As Natio Lasman.

Dosen-dosen Pasca sarjana Universitas Darma Persada , Dr. Ir. Muhammad Syukri Nur, Msi, Ir. Erkata Yandri, M.Sc.rer.nat, Dr. Ir. Jatmiko Prio Atmojo, M.Eng , Ir. Riki Firmanda Ibrahim, M.Sc, Ir. Ratna Ariati, M.Sc. Drs. Soeripno, M.T dan dosen lainnya yang meskipun namanya tidak dapat disebutkan satu persatu tapi tetap terkenang di hati penulis.

Terima kasih kepada rekan-rekan seperjuangan Teknik Energi Terbarukan yang selalu memberikan semangat dan dukungan untuk sama-sama dapat menyelesaikan tesis ini.



DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
LEMBAR PERSETUJUAN TESIS.....	v
KATA PENGANTAR	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1 Pendahuluan	2
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Batasan Masalah.....	6
BAB 2 Tinjauan Pustaka.....	7
2.1 Energi Surya	7
2.2 Aplikasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya	9
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung.....	11
2.3.1 Komponen PLTS Terapung	12
2.3.2 Indikator Kinerja PLTS.....	15
2.3.3 Regulasi Terkait PLTS Terapung.	16

2.3.4	Tekno Ekonomis.....	18
2.3.5	Kelayakan Finansial.....	25
BAB 3	Metodologi Penelitian.....	30
3.1	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	30
3.2	Bahan dan Alat	31
3.2.1	Bahan Penelitian.....	31
3.2.2	Perangkat Lunak <i>PVsyst</i>	31
3.3	Alur Penelitian.....	31
BAB 4	Hasil dan Pembahasan	33
4.1	Hasil.....	33
4.1.1	Identifikasi Lokasi	33
4.1.2	Rancangan Teknis.....	41
4.2	Pembahasan.....	52
4.2.1	Asumsi yang Diterapkan dalam Model Energi	52
4.2.2	Simulasi Bayangan	53
4.2.3	Analisa Hasil Simulasi Produksi	55
4.2.4	Estimasi Biaya Proyek	58
4.2.5	Analisa Kelayakan Finansial.....	64
BAB 5	Kesimpulan dan Saran	65
5.1	Kesimpulan.....	65
5.2	Saran	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Perbandingan potensi besar sumber daya matahari dengan sumber daya terbarukan lainnya, cadangan energi fosil dan cadangan nuklir	8
Gambar II.2 Tiga Komponen Iradiasi Matahari	9
Gambar III.1 Alur Penelitian.....	32
Gambar IV.1 Peta Administrasi Kabupaten Wonogiri.....	34
Gambar IV.2 Peta Geologi Lembar Surakarta-Gitontoro	35
Gambar IV.3 Peta Petahan Aktif Indonesia.....	36
Gambar IV.4 Rona Elevasi Dasar Waduk Wonogiri	38
Gambar IV.5 Citra Satelit Karamba Jaring Apung	39
Gambar IV.6 Potensi Titik Interkoneksi ke Jaringan 150 kV	41
Gambar IV.7 Pulau Surya Besar Berkapasitas 12,09 – 12,15 MWp	42
Gambar IV.8 Pulau Surya Kecil Berkapasitas 5,97 – 5,99 MWp	43
Gambar IV.9 Lokasi Potensial Penempatan PLTS Terapung di Waduk Wonogiri	44
Gambar IV.10 Konfigurasi <i>floater</i> 2-in-a row.....	48
Gambar IV.11 Konfigurasi <i>anchor dan mooring</i> pulau surya berkapasitas 12,09 ~ 12,15 MWp.....	51
Gambar IV.12 Konfigurasi <i>anchor dan mooring</i> pulau surya berkapasitas 5,97 ~ 6,0 MWp	51
Gambar IV.13 <i>Far Shading</i> PLTS Wonogiri	54
Gambar IV.14 <i>Near Shading</i> PLTS Wonogiri	55
Gambar IV.15 Grafik Produksi Listrik PLTS Terapung Kapasitas 254,8 MWp	57
Gambar IV.16 Grafik Produksi Listrik PLTS Terapung Kapasitas 259,5 MWp	57

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Harga Patokan PLTS Terapung Kapasitas 50 MW	18
Tabel II.2 Harga Pembelian Tenaga Listrik dari PLTS Fotovoltaik (belum Termasuk Fasilitas Baterai atau Fasilitas Penyimpanan Energi Listrik Lainnya)	23
Tabel II.3 Besaran Faktor Lokasi (F).....	23
Tabel III.1 Jadwal Penelitian.....	30
Tabel IV.1 Konfigurasi PLTS Terapung di Waduk Wonogiri	44
Tabel IV.2 Spesifikasi modul surya Trina Solar	46
Tabel IV.3 Spesifikasi Inverter Sungrow	47
Tabel IV.4 Parameter Beban Lingkungan dan Desain Sistem <i>Anchoring</i> dan <i>Mooring</i>	49
Tabel IV.5 Asumsi Kehilangan Energi	52
Tabel IV.6 Analisa Hasil Simulasi Produksi Energi.....	56
Tabel IV.7 Unit Harga Komponen PLTS Terapung.....	59
Tabel IV.8 Biaya Investasi PLTS Terapung Wonogiri.....	60
Tabel IV.9 Perhitungan LCC dan LCoE Metode Diskonto PLTS Terapung Wonogiri.....	61
Tabel IV.10 Perhitungan Biaya Tahunan dan LCoE Metode Anuitas PLTS Terapung Wonogiri	63
Tabel IV.11 Analisa Perhitungan Kelayakan Finansial	64

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
BCR	Benefit Cost Ratio	26
BOS	Balanced of System	15
CF	Capacity Factor , Faktor Kapasitas	3
CSP	Concentrated Solar Power	9
DNI,DHI,GHI,	Direct Normal Irradiance, Diffuse Horizontal Irradiance, Global Horizontal Irradiance	8,9
EPC	Engineering Procurement Construction	60
FPV	Floating Photovoltaic (PLTS Terapung)	3
GWp (GW_{DC})	Gigawatt peak, GW direct current	3
IP	Ingress Protection	57
IRR	Internal Rate of Return	25
kV	Kilo-Volts	38
LBPV	Land Based Photovoltaic (PLTS Ground Mounted)	3
LCC	Life Cycle Cost	10
LcoE	Levellized Cost of Energy	20
Mdpl	Meter di atas permukaan laut	35
MPPT	Maximum Point	46
MWp (MW_{DC})	Megawatt peak, MW direct current	31
MW_{AC}	MW alternating current	3
MV,LV,HV	Medium , Low, High Voltage	46, 58, 47
MVA	MegaVolt-Ampere	38
NPV	Net Present Value	25
O&M	Operation and Maintenance	14
PBP	Payback Period	25

PLN	Perusahaan Listrik Negara	19
PLTS	Pembangkit Listrik Tenaga Surya	4
PLTA,PLTB,PLTD	Pembangkit Listrik Tenaga Air, Bayu, Diesel	3,10
PI	Profitability Index	25
PR	Performance Ratio, Efisiensi Pembangkitan	3
PV	Photovoltaic	7
RUPTL	Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik	4
STC	Standard Test Condition	15
GW,MW, TW	Gigawatt, Megawatt, Terrawatt	2,3,56

LAMBANG

$\cos \varphi$	Faktor daya,	38
C_t	Biaya Investasi	2
DF	Discount Factor	18
NCF	Net Cashflow	26
r	Suku Bunga Diskonto	20
Y_f	Yield Factor, faktor hasil	15
Y_r	Reference Yield, hasil referensi	15
θ	Sudut zenit matahari	9

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.1 Katalog Panel Surya Modul 700 Wp	71
Lampiran 1.2 Katalog Panel Surya Modul 650 Wp	73
Lampiran 2.1 Katalog Inverter 4400 kWAC	75
Lampiran 2.2 Katalog Inverter 1100 kWAC	77
Lampiran 3.1 Simulasi PVSyst Kasus-1	79