

**ANALISIS KINERJA DAN EVALUASI TEKNO-EKONOMI  
RETROFITTING ENERGI SURYA UNTUK PEMBANGKIT  
LISTRIK BATUBARA DI PROVINSI KALIMANTAN TENGAH**

**Tesis**

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



**Disusun Oleh:**

**IRFAN ALI  
30000421410018**

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

**2025**

## PERSETUJUAN UJIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini. Dosen Pembimbing dari:

Mahasiswa : Irfan Ali  
NIM : 30000421410018  
Program Studi : Magister Energi  
Judul Tesis : Analisis Kinerja dan Evaluasi Tekno-Ekonomi *Retrofitting* Energi Surya Untuk Pembangkit Listrik Batubara di Provinsi Kalimantan Tengah.

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

Semarang, 28 February 2025

Pembimbing Pertama

**Prof. Dr. Ir. Hadiyanto S.T., M.Sc., IPU**  
NIP. 197510281999031004

Pembimbing Kedua

**Dr. Asep Yoyo Wardaya, S.Si, M.Si**  
NIP.1957092919861002

**HALAMAN PENGESAHAN  
TESIS**

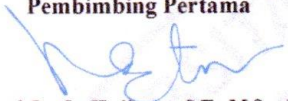
**ANALISIS KINERJA DAN EVALUASI TEKNO-EKONOMI *RETROFITTING*  
ENERGI SURYA UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK BATUBARA DI PROVINSI  
KALIMANTAN TENGAH**

Disusun Oleh:  
IRFAN ALI  
30000421410018

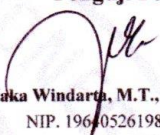
Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji  
Pada Tanggal: 28 February 2025

Tim Penguji,

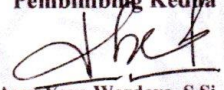
**Pembimbing Pertama**

  
Prof. Dr. Ir. Hadiyanto S.T., M.Sc., IPU  
NIP. 197510281999031004

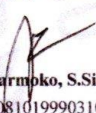
**Penguji Pertama**

  
Dr. Ir. Jaka Windarta, M.T., IPU, Asean. Eng  
NIP. 196405261989031002

**Pembimbing Kedua**

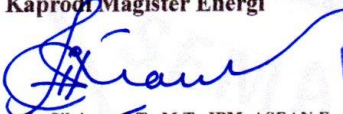
  
Dr. Asep Yoyo Wardaya, S.Si, M.Si  
NIP. 197110021997021001

**Penguji Kedua**

  
Dr. Eng Udi Harmoko, S.Si, M.Si  
NIP. 197108101999031001

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar  
**Magister Energi**  
Pada Tanggal: Maret 2025

**Kaprodi Magister Energi**

  
Prof. Dr. Ing. Ir. Silviana, S.T., M.T., IPM, ASEAN Eng  
NIP. 197412162000122001

**Dekan Sekolah Pascasarjana**

  
Prof. Ir. Mochammad Agung Wibowo, M.M., M.Sc., Ph.D  
NIP. 196702081994031005

## HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tesis yang saya susun dengan judul “Analisis Kinerja dan Evaluasi Tekno-Ekonomi *Retrofitting* Energi Surya Untuk Pembangkit Listrik Batubara di Provinsi Kalimantan Tengah.” sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister dari Program Studi Magister Energi seluruhnya merupakan hasil karya sendiri.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan Tesis yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Apabila pada kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian Tesis ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya sandang dan sanksi-sanksi lainnya sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Semarang, 28 February 2025



Irfan Ali

30000421410018

## PERNYATAAN PERSETUJUAN

### PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Irfan Ali  
NIM : 30000421410018  
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:

***“Performance analysis and techno-economic evaluation of solar energy retrofitting for coal-fired power plant in Central Kalimantan Province”.***

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 mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Dibuat di: Semarang Pada Tanggal,

28 February 2025



Irfan Ali

30000421410009

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karuniaNya, sehingga saya dapat menyelesaikan proposal tesis yang berjudul “Analisis Kinerja dan Evaluasi Tekno-Ekonomi *Retrofitting* Energi Surya Untuk Pembangkit Listrik Batubara di Provinsi Kalimantan Tengah”. Proposal tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Master Energi pada Program Studi Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro Semarang.

Pada kesempatan ini penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membimbing, memberi bantuan, arahan dan saran dalam penyusunan Proposal Tesis ini kepada:

1. Prof. Ir. Mochammad Agung Wibowo, M.M., M.Sc., Ph.D selaku Dekan Pascasarjana, Universitas Diponegoro Semarang.
2. Prof. Dr.Ing. Ir. Silviana, S.T., M.T., IPM, ASEAN Eng selaku Ketua Program Studi Magister Energi Universitas Diponegoro Semarang.
3. Prof. Dr. Hadiyanto, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing I atas segala waktu, bimbingan, dan arahan selama penyusunan proposal tesis ini.
4. Dr. Asep Yoyo Wardaya, S. Si, M. Si. selaku Pembimbing II atas segala waktu, bimbingan, dan arahan selama penyusunan proposal tesis ini.
5. Bapak dan Ibu dosen Magister Energi yang telah memberikan ilmunya.
6. Ayah, Ibu dan istri serta kedua anak dan segenap keluarga yang selalu memberikan dukungan dan perhatian serta semangat kepada penulis.
7. Teman-teman Magister Energi Ganjil 2021 yang selalu mendukung dan menumbuhkan forum diskusi dan berbagi ilmu yang luar biasa memberi manfaat dan semangat kepada penulis.
8. Semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya Proposal Tesis ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata penulis memohon maaf apabila terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan Tesis ini. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan dan pengembangan Tesis ini kearah yang lebih baik. Semoga segala yang tertuang dalam Tesis ini memberikan manfaat bagi kita semua baik sekarang maupun dimasa akan datang. Mudah-mudahan usaha penyusunan Tesis ini memperoleh berkat dan karunia dari Allah SWT. Amin.

Semarang, 28 Februari 2025

Irfan Ali

## INTISARI

Sektor pembangkit listrik berkontribusi terhadap perubahan iklim, sehingga upaya mitigasi diperlukan untuk memastikan komitmen membatasi kenaikan suhu global di bawah 2°C tetap berjalan. Salah satu langkah strategis adalah mengintegrasikan energi terbarukan ke dalam pembangkit listrik yang sudah ada. Studi ini meneliti integrasi energi surya dalam operasional pembangkit listrik tenaga batu bara dengan menggantikan ekstraksi uap pada pemanas air umpan bertekanan tinggi No. 7. Analisis dilakukan terhadap kinerja sebelum dan sesudah *retrofit* dalam dua mode: peningkatan daya (PB) dan penghematan bahan bakar (FS), termasuk evaluasi pada berbagai tingkat beban. Hasil menunjukkan peningkatan efisiensi termal hingga 2% pada kedua mode. Konsumsi bahan bakar spesifik menurun signifikan, dengan penurunan sebesar 15,05 g/kWh pada mode PB dan 15,75 g/kWh pada mode FS. Pengurangan konsumsi batubara berkontribusi pada penurunan emisi CO<sub>2</sub> masing-masing sebesar 4,69% (FS) dan 4,94% (PB). Efisiensi konversi tenaga surya ke listrik meningkat seiring penurunan beban. Dalam mode FS, kontribusi listrik tenaga surya pada beban VWO, 100%, 75%, dan 50% masing-masing sebesar 5,23%, 5,53%, 7,76%, dan 11,92%. LCOE listrik tenaga surya untuk kedua mode tercatat sebesar Rp 431,82/kWh, dengan estimasi pengembalian investasi dalam 5,87 tahun.

**Kata kunci:** *pembangkit listrik tenaga batu bara, emisi CO<sub>2</sub>, energi surya, skenario retrofit, peningkatan daya (PB), penghematan bahan bakar (FS).*

## ABSTRACT

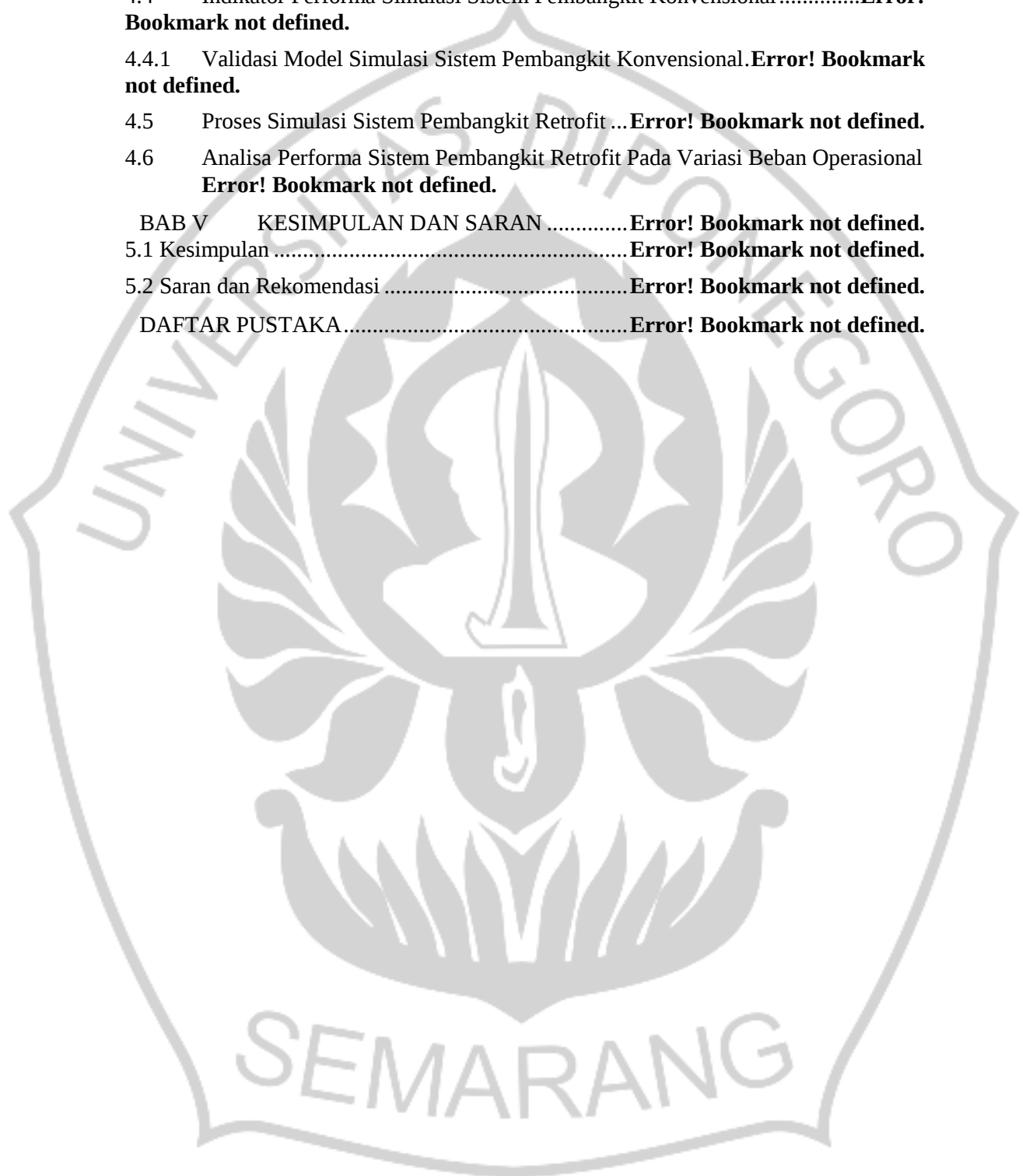
*The power generation sector contributes to climate change, making mitigation efforts essential to ensuring the commitment to limiting global temperature rise below 2°C remains on track. One strategic approach is integrating renewable energy into existing power plants. This study examines the integration of solar energy into coal-fired power plant operations by replacing steam extraction in high-pressure feedwater heater No. 7. Performance analysis was conducted before and after the retrofit under two modes: power boost (PB) and fuel saving (FS), including evaluations at various load levels. Results show an increase in thermal efficiency of up to 2% in both modes. Specific fuel consumption decreased significantly, with reductions of 15.05 g/kWh in PB mode and 15.75 g/kWh in FS mode. Lower coal consumption contributed to CO<sub>2</sub> emission reductions of 4.69% (FS) and 4.94% (PB), respectively. Solar-to-electricity conversion efficiency improved as load decreased. In FS mode, solar power contributions at VWO, 100%, 75%, and 50% load levels were 5.23%, 5.53%, 7.76%, and 11.92%, respectively. The levelized cost of electricity (LCOE) for solar power in both modes was recorded at 431.82 Rupiah/kWh, with an estimated investment payback period of 5.87 years*

**Kata kunci:** coal-fired power plant, CO<sub>2</sub> emission, solar energy, retrofit scenario, power-boost (PB), fuel-save (FS)

## DAFTAR ISI

|                                                            |                              |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|
| PERSETUJUAN UJIAN TESIS .....                              | 2                            |
| HALAMAN PERNYATAAN .....                                   | 4                            |
| KATA PENGANTAR .....                                       | 6                            |
| INTISARI .....                                             | 7                            |
| DAFTAR ISI .....                                           | 9                            |
| DAFTAR TABEL .....                                         | 11                           |
| DAFTAR GAMBAR .....                                        | 12                           |
| DAFTAR ISTILAH .....                                       | 13                           |
| BAB I PENDAHULUAN .....                                    | 14                           |
| 1.1 Latar Belakang .....                                   | Error! Bookmark not defined. |
| 1.2 Perumusan Masalah .....                                | Error! Bookmark not defined. |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....                                | Error! Bookmark not defined. |
| 1.4 Manfaat Penelitian .....                               | Error! Bookmark not defined. |
| 1.5 Originalitas Penelitian .....                          | Error! Bookmark not defined. |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....                              | Error! Bookmark not defined. |
| 2.1 Termodinamika .....                                    | Error! Bookmark not defined. |
| 2.2 Siklus Daya Termodinamika .....                        | Error! Bookmark not defined. |
| 2.3 <i>Retrofitting</i> .....                              | Error! Bookmark not defined. |
| 2.4 <i>Concentrating Solar Power (CSP)</i> .....           | Error! Bookmark not defined. |
| 2.5 <i>Design Parameter Concentrated Solar Power</i> ..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.6 <i>Solar Aided Power Generation (SAPG)</i> .....       | Error! Bookmark not defined. |
| BAB III METODE PENELITIAN .....                            | Error! Bookmark not defined. |
| 3.1 Lokasi Penelitian .....                                | Error! Bookmark not defined. |
| 3.2 Kerangka Pikir Penelitian .....                        | Error! Bookmark not defined. |
| 3.3 Jenis 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. |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....                          | Error! Bookmark not defined. |
| 4.1 Sumber Energi .....                                    | Error! Bookmark not defined. |
| 4.1.1 Batubara .....                                       | Error! Bookmark not defined. |
| 4.1.2 Sumber Energi Matahari .....                         | Error! Bookmark not defined. |
| 4.2 Ketersediaan lahan .....                               | Error! Bookmark not defined. |

|                                  |                                                                            |                                     |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 4.3                              | Proses Simulasi Sistem Pembangkit Konvensional.....                        | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 4.4                              | Indikator Performa Simulasi Sistem Pembangkit Konvensional .....           | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 4.4.1                            | Validasi Model Simulasi Sistem Pembangkit Konvensional.                    | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 4.5                              | Proses Simulasi Sistem Pembangkit Retrofit ...                             | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 4.6                              | Analisa Performa Sistem Pembangkit Retrofit Pada Variasi Beban Operasional | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN ..... |                                                                            | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 5.1                              | Kesimpulan .....                                                           | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 5.2                              | Saran dan Rekomendasi .....                                                | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| DAFTAR PUSTAKA.....              |                                                                            | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |



## DAFTAR TABEL

|                                                                                                    |                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Tabel 1. 1 Ringkasan penelitian terdahulu .....                                                    | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 2. 1 Tabel konversi untuk nilai irradiance matahari                                          | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 3. 1 Titik parameter operasional.....                                                        | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 1 Hasil analisa <i>ultimate</i> sampel batubara.....                                      | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 2 Hasil analisa proksimat sampel batubara.....                                            | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 3 Parameter sumber energi matahari .....                                                  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 4 Parameter model simulasi main steam dan reheat steam generator .....                    | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 5 komposisi aliran fluegas model simulasi furnace .....                                   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 6 Daya keluaran shaft turbin pada masing masing stage ...                                 | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 7 Performa masing masing model simulasi feedwater preheater .....                         | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 8 Perbandingan parameter desain dan simulasi ...                                          | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 9 Parameter yang mempengaruhi sumber energi matahari                                      | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 10 Perbandingan parameter desain dan simulasi .                                           | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 11 Parameter estimasi biaya retrofit (Shagdar et al. ,2021)                               | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tabel 4. 12 Perbandingan parameter sebelum dan sesudah retrofit pada kondisi operasional TMCR..... | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                            |                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Gambar 2. 1 Hukum pertama termodinamika (Cengel, 2011).....                                                                                                | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 2 Prinsip konservasi energi pada tubuh manusia (Cengel, 2011) .....                                                                              | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 3 Skema siklus rankine ideal (Cengel, 2011)...                                                                                                   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 4 Sistem CSP tipe Parabolic Trough.....                                                                                                          | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 5 Sistem CSP tipe Central Receiver Tower .....                                                                                                   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 6 Sistem CSP tipe Linear Fresnel .....                                                                                                           | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 7 Sistem CSP tipe Fresnel Lenses.....                                                                                                            | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 8 Sistem CSP tipe Paraboloidal dishes .....                                                                                                      | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 9 Posisi matahari dalam sistem koordinat terestrial .....                                                                                        | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 10 Skema pyranometer .....                                                                                                                       | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 11 Skema diagram pembangkit listrik dengan sistem SAPG. (Shagdar, 2022) .....                                                                    | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 12 Konsep SAPG konvensional. (Shagdar, 2022) .....                                                                                               | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 2. 13 Alternatif mode (a) “power boosting” dan (b) “fuel saving” harian untuk pembangkit SAPG (Shagdar, 2022) .....                                 | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 3. 1 Lokasi Pembangkit Listrik Batubara 2x115 MW                                                                                                    | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 3. 2 Alur kerangka pemikiran penelitian.....                                                                                                        | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 3. 3 Titik parameter operasional (tekanan, temperatur, dan laju aliran massa) pembangkit listrik batubara 115 MW .....                              | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 1 Ketersediaan lahan untuk system solar collector                                                                                                | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 2 Simplifikasi model main steam dan reheat steam generator .....                                                                                 | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 3 Model simulasi furnace yang disederhanakan. ....                                                                                               | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 4 Simplifikasi model simulasi steam turbin .....                                                                                                 | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 5 Simplifikasi model simulasi condenser.....                                                                                                     | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 6 Simplifikasi model simulasi feedwater preheater .....                                                                                          | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 7 simplifikasi model simulasi deaerator .....                                                                                                    | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 8 model simulasi solar collector .....                                                                                                           | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 9 Simulasi heat and mass balance pembangkit setelah retrofit pada kondisi operasional TMCR.....                                                  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 10 Indikator kinerja pembangkit dipengaruhi oleh beban daya variabel; (a) Gross thermal efficiency (b) Power Generated. ....                     | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 11 Indikator kinerja pembangkit dipengaruhi oleh beban daya variabel; (a) Specific heat consumption (b) Specific eq. fuel consumption. ....      | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 12 Indikator kinerja sistem energi panas matahari dipengaruhi oleh beban daya variabel; (a) Solar percentage (b) solar to power efficiency. .... | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Gambar 4. 13 laju emisi CO <sub>2</sub> dan laju konsumsi batubara terhadap variasi beban operasional. ....                                                | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |

Gambar 4. 14 Simple Payback Period (SPP) terhadap variasi beban operasional. ....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 15 Estimasi LCOE terhadap variasi beban operasional. **Error! Bookmark not defined.**

#### DAFTAR ISTILAH

|                   |                                                   |
|-------------------|---------------------------------------------------|
| CFB               | <i>Circulating Fluidized Bed</i>                  |
| CNY               | <i>Chinese Yuan</i>                               |
| CPV               | <i>Concentrator Photovoltaics</i>                 |
| CRF               | <i>Capital Recovery Factor</i>                    |
| CSP               | <i>Concentrating Solar Power</i>                  |
| DNI               | <i>Direct Normal Irradiance</i>                   |
| FWH               | <i>Feedwater Heater</i>                           |
| GHI               | <i>Global Horizontal Irradiance</i>               |
| HVAC              | <i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i> |
| HTF               | <i>Heat Transfer Fluid</i>                        |
| LED               | <i>Light-Emitting Diode</i>                       |
| LCOE              | <i>Levelized Cost of Energy</i>                   |
| NDC               | <i>Nationally Determined Contributions</i>        |
| Nox               | <i>Nitrogen Oxides</i>                            |
| OPEX              | <i>Operational Expenditure</i>                    |
| PLTU              | <i>Pembangkit Listrik Tenaga Uap</i>              |
| PV                | <i>Photovoltaic</i>                               |
| SAPG              | <i>Solar Aided Power Generation</i>               |
| S-CO <sub>2</sub> | <i>Supercritical Carbon Dioxide</i>               |
| SCR               | <i>Selective Catalytic Reduction</i>              |
| SPP               | <i>Simple Payback Period</i>                      |
| TES               | <i>Thermal Energy Storage</i>                     |

TMCR

*Turbine Maximum Continuous Rating*

VWO

*Valve Wide Open*



## BAB I PENDAHULUAN

