

## DAFTAR ISI

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| LEMBAR PENGESAHAN .....  | ii                                  |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....                                    | iii                                 |
| PRAKATA .....  | iv                                  |
| DAFTAR ISI.....  | vi                                  |
| DAFTAR GAMBAR .....  | viii                                |
| DAFTAR TABEL .....   | ix                                  |
| ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....                                    | x                                   |
| ABSTRAK.....   | xii                                 |
| ABSTRACT.....  | xiii                                |
| BAB I PENDAHULUAN.....   | 1                                   |
| 1.1 Latar Belakang.....  | 1                                   |
| 1.2 Rumusan Masalah.....   | 3                                   |
| 1.3 Batasaan Penelitian.....                                       | 4                                   |
| 1.4 Tujuan Penelitian .....  | 4                                   |
| 1.5 Keaslian dan Kontribusi Penelitian .....                       | 5                                   |
| 1.6 Manfaat Penelitian.....  | 9                                   |
| 1.7 Sistematika Penulisan .....                                    | 9                                   |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....                    | 10                                  |
| 2.1 Tinjauan Pustaka.....  | 10                                  |
| 2.2 Landasan Teori.....  | 12                                  |
| 2.2.1 <i>Generation Expansion Planning (GEP)</i> .....             | 12                                  |
| 2.2.2 Keandalan Sistem .....                                       | 16                                  |
| 2.2.3 <i>Reserve Margin</i> .....                                  | 16                                  |
| 2.2.4 <i>Levelized Cost of Electricity (LCOE)</i> .....            | 17                                  |
| 2.2.5 Sistem Ketenagalistrikan Sumatera .....                      | 18                                  |
| 2.2.6 Peramalan Permintaan Energi Listrik.....                     | 20                                  |
| 2.2.7 Pembangkit Konvensional.....                                 | 21                                  |
| 2.2.8 Pembangkit Energi Baru Terbarukan.....                       | 22                                  |
| 2.2.9 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir.....                        | 22                                  |
| 2.2.10 <i>Battery Energy Storage System (BESS)</i> .....           | 24                                  |
| 2.2.11 Emisi Gas Karbondioksida (CO <sub>2</sub> ).....            | 24                                  |
| 2.2.12 <i>Software Low Emission Analysis Platform (LEAP)</i> ..... | 25                                  |
| 2.3 Pertanyaan Penelitian.....                                     | 27                                  |
| 2.4 Hipotesis .....  | 27                                  |
| BAB III METODOLOGI.....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| 3.1 Alat dan Bahan .....   | 28                                  |
| 3.1.1 Alat Penelitian.....   | 28                                  |
| 3.1.2 Bahan Penelitian .....                                       | 28                                  |
| 3.2 Alur Penelitian.....   | 28                                  |
| 3.3 Pemodelan Matematis.....                                       | 30                                  |
| 3.3.1 Fungsi Objektif.....   | 30                                  |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 3.3.2                                   | Kekangan Optimasi.....   | 32        |
| 3.4                                     | Data dan Asumsi.....   | 34        |
| 3.4.1                                   | Proyeksi Beban Puncak dan Kebutuhan Energi.....                    | 34        |
| 3.4.2                                   | Potensi Energi Primer.....   | 36        |
| 3.4.3                                   | Komposisi Pembangkit.....  | 37        |
| 3.4.4                                   | Parameter Teknis Pembangkit.....                                   | 38        |
| 3.4.5                                   | Parameter Teknis <i>Battery Energy Storage System (BESS)</i> ..... | 39        |
| 3.4.6                                   | Profil Pembangkit <i>Intermittent</i> .....                        | 40        |
| 3.4.7                                   | Parameter Ekonomi Pembangkit.....                                  | 41        |
| 3.4.8                                   | Biaya Bahan Bakar.....   | 42        |
| 3.4.9                                   | Faktor Emisi.....  | 43        |
| 3.4.10                                  | Parameter Pemodelan Sistem.....                                    | 44        |
| 3.5                                     | Skenario Penelitian.....   | 45        |
| 3.6                                     | Cara Analisis.....   | 46        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b> |  | <b>47</b> |
| 4.1                                     | Skenario <i>Business as Usual</i> .....                            | 47        |
| 4.1.1                                   | Kapasitas Pembangkit.....  | 47        |
| 4.1.2                                   | Produksi Energi Pembangkit.....                                    | 49        |
| 4.1.3                                   | Emisi CO <sub>2</sub> .....  | 50        |
| 4.1.4                                   | Biaya Perencanaan Pembangkit.....                                  | 51        |
| 4.2                                     | Skenario <i>Renewable Indonesia Base</i> .....                     | 53        |
| 4.2.1                                   | Kapasitas Pembangkit.....  | 53        |
| 4.2.2                                   | Produksi Energi Pembangkit.....                                    | 55        |
| 4.2.3                                   | Emisi CO <sub>2</sub> .....  | 56        |
| 4.2.4                                   | Biaya Perencanaan Pembangkit.....                                  | 57        |
| 4.3                                     | Skenario <i>Accelerated Renewable Energy Development</i> .....     | 59        |
| 4.3.1                                   | Kapasitas Pembangkit.....  | 59        |
| 4.3.2                                   | Produksi Energi Pembangkit.....                                    | 61        |
| 4.3.3                                   | Emisi CO <sub>2</sub> .....  | 62        |
| 4.3.4                                   | Biaya Perencanaan Pembangkit.....                                  | 62        |
| 4.4                                     | Perbandingan Antar Skenario.....                                   | 64        |
| 4.4.1                                   | Perbandingan Emisi CO <sub>2</sub> .....                           | 64        |
| 4.4.2                                   | Perbandingan Struktur Biaya.....                                   | 66        |
| 4.4.3                                   | Perbandingan Parameter Teknis dan Ekonomi.....                     | 67        |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>  |  | <b>69</b> |
| 5.1                                     | Kesimpulan.....  | 69        |
| 5.2                                     | Saran.....   | 70        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>              |  | <b>71</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>                    |  | <b>77</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2.1 Peta sistem tenaga listrik sumatera .....                            | 19 |
| Gambar 2.2 Generasi sistem energi nuklir.....                                   | 23 |
| Gambar 2.3 Struktur <i>software low emission analysis platform (LEAP)</i> ..... | 26 |
| Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> alur penelitian.....                                | 29 |
| Gambar 3.2 Proyeksi permintaan energi.....                                      | 34 |
| Gambar 3.3 Proyeksi beban puncak .....  | 35 |
| Gambar 3.4 <i>Solar availability</i> .....                                      | 40 |
| Gambar 3.5 <i>Wind availability</i> .....                                       | 41 |
| Gambar 4.1 Kapasitas pembangkit skenario BaU .....                              | 48 |
| Gambar 4.2 Produksi energi pembangkit skenario BaU.....                         | 50 |
| Gambar 4.3 Emisi CO <sub>2</sub> pembangkit skenario BaU.....                   | 51 |
| Gambar 4.4 Akumulatif biaya perencanaan pembangkit skenario BaU.....            | 52 |
| Gambar 4.5 LCOE skenario BaU .....  | 52 |
| Gambar 4.6 Kapasitas pembangkit dan BESS skenario RE Base .....                 | 54 |
| Gambar 4.7 Produksi energi pembangkit skenario RE Base .....                    | 55 |
| Gambar 4.8 Emisi CO <sub>2</sub> pembangkit skenario RE Base .....              | 57 |
| Gambar 4.9 Akumulatif biaya perencanaan pembangkit skenario RE Base .....       | 58 |
| Gambar 4.10 LCOE skenario RE Base.....  | 58 |
| Gambar 4.11 Kapasitas pembangkit dan BESS skenario ARED.....                    | 59 |
| Gambar 4.12 Produksi energi pembangkit skenario ARED .....                      | 61 |
| Gambar 4.13 Emisi CO <sub>2</sub> pembangkit skenario ARED .....                | 62 |
| Gambar 4.14 Akumulatif biaya perencanaan pembangkit skenario ARED.....          | 63 |
| Gambar 4.15 LCOE skenario ARED.....   | 63 |
| Gambar 4.21 Emisi CO <sub>2</sub> antar skenario.....                           | 65 |
| Gambar 4.22 Total biaya sistem antar skenario .....                             | 66 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 1.1 <i>State of the Art</i> Penelitian.....                           | 5  |
| Tabel 2.1 Penjualan Tenaga Listrik Sumatera (GWh) .....                     | 20 |
| Tabel 2.2 Penambahan Pembangkit Sumatera (MW) .....                         | 20 |
| Tabel 2.3 Reaktor Nuklir di Indonesia.....                                  | 23 |
| Tabel 3.1 Potensi Energi Primer .....                                       | 36 |
| Tabel 3.2 Data Penambahan Pembangkit Sistem Sumatera.....                   | 37 |
| Tabel 3.3 Parameter Teknis Pembangkit.....                                  | 38 |
| Tabel 3.4 Parameter Teknis <i>Battery Energy Storage System</i> (BESS)..... | 39 |
| Tabel 3.5 Parameter Ekonomi Pembangkit.....                                 | 42 |
| Tabel 3.6 Biaya Bahan Bakar.....  | 43 |
| Tabel 3.7 Faktor Emisi CO <sub>2</sub> .....                                | 43 |
| Tabel 3.8 Parameter Pemodelan Sistem.....                                   | 44 |
| Tabel 4.1 Perbandingan Struktur Biaya Antar Skenario .....                  | 66 |
| Tabel 4.2 Perbandingan Parameter Antar Skenario .....                       | 68 |

## ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Arti singkatan pada tesis ini sebagai berikut

| Akronim         | Kepanjangan   |
|-----------------|---|
| <b>A - F</b>    |   |
| BAU             | = <i>Business as Usual</i>                            |
| BBM             | = Bahan Bakar Minyak                                  |
| BCR             | = <i>Benefit Cost Ratio</i>                           |
| BESS            | = <i>Battery Energy Storage System</i>                |
| BPP             | = Biaya pokok pembangkitan                            |
| CF              | = <i>Capacity Factor</i>                              |
| CO <sub>2</sub> | = Karbon Dioksida                                     |
| EBT             | = Energi Baru Terbarukan                              |
| ENDC            | = <i>Enhanced-Nationally Determined Contribution</i>  |
| ENS             | = <i>Energy Not Served</i>                            |
| ESDM            | = Energi Sumber Daya dan Mineral                      |
| FC              | = <i>Fuel Cost</i>                                    |
| FOR             | = <i>Forced Outage Rate</i>                           |
| <b>G - L</b>    |   |
| GEP             | = <i>Generation Expansion Planning</i>                |
| GRK             | = Gas Rumah Kaca                                      |
| IPP             | = <i>Independent Power Producer</i>                   |
| IPCC            | = <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>    |
| IRR             | = <i>Internal Rate of Return</i>                      |
| KEN             | = Kebijakan Energi Nasional                           |
| LCOE            | = <i>Levelized Cost of Electricity</i>                |
| LEAP            | = <i>Low Emissions Analysis Platform</i>              |
| LNG             | = <i>Liquified Natural Gas</i>                        |
| LOLE            | = <i>Loss of Load Expectation</i>                     |
| LOLP            | = <i>Loss of Load Probability</i>                     |
| <b>M - P</b>    |   |
| MFO             | = <i>Marine Fuel Oil</i>                              |
| MILP            | = <i>Mixed Integer Linear Programming</i>             |
| MMBtu           | = <i>Metric Million British Thermal Unit</i>          |
| NDC             | = <i>Nationally Determined Contributions</i>          |
| NEMO            | = <i>Next Energy Modeling System for Optimization</i> |
| NPV             | = <i>Net Present Value</i>                            |
| NZE             | = <i>Net Zero Emission</i>                            |
| PLN             | = Perusahaan Listrik Negara                           |
| PLTA            | = Pembangkit Listrik Tenaga Air                       |
| PLTB            | = Pembangkit Listrik Tenaga Bayu                      |

|        |  |
|--------|--|
| PLTBio | = Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa   |
| PLTD   | = Pembangkit Listrik Tenaga Diesel     |
| PLTG   | = Pembangkit Listrik Tenaga Gas        |
| PLTGU  | = Pembangkit Listrik Tenaga Gas-Uap    |
| PLTM   | = Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro  |
| PLTMG  | = Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas  |
| PLTMH  | = Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro |
| PLTP   | = Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi |
| PLTS   | = Pembangkit Listrik Tenaga Surya      |
| PLTU   | = Pembangkit Listrik Tenaga Uap        |
| PV     | = <i>Photovoltaic</i>                  |

## R - Z

|       |   |
|-------|---|
| RES   | = <i>Renewable Energy Sources</i>         |
| RUEN  | = Rencana Umum Energi Nasional            |
| RUKN  | = Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional |
| RUPTL | = Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik |
| SDG   | = <i>Sustainable Development Goals</i>    |
| VRE   | = <i>Variable Renewable Energy</i>        |

## Arti lambang pada tesis ini sebagai berikut

|            |   |
|------------|---|
| $C$        | = total biaya (USD)                                       |
| $G$        | = teknologi pembangkit EBT                                |
| $T$        | = tahun   |
| $R$        | = teknologi pembangkit pada grid                          |
| $e$        | = polutan   |
| $P^N$      | = kapasitas pembangkit                                    |
| $DFC_t$    | = discount factor untuk investasi modal                   |
| $DF_t$     | = <i>discount factor</i>                                  |
| $F^{OM}$   | = biaya <i>fixed operation and maintenance</i> pembangkit |
| $F^{VAR}$  | = biaya <i>variable operating and maintenance</i>         |
| $FE_{r,e}$ | = faktor emisi  |
| $EK_{r,t}$ | = energi yang dikonsumsi pembangkit grid                  |