



TESIS - TM 185400

# OPTIMASI PENYIMPANAN ENERGI TERBARUKAN DENGAN BATERAI DAN HIDROGEN DI PULAU BAWEAN

KHALIKUL HAQQUR RAHMAN  
NRP. 6007201006

Dosen Pembimbing I  
Suwarno ST., MSc., Ph.D.

Dosen Pembimbing II  
Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA





**TESIS - TM 185400**

**OPTIMASI PENYIMPANAN ENERGI TERBARUKAN DENGAN  
BATERAI DAN HIDROGEN DI PULAU BAWEAN**

**KHALIKUL HAQQUR RAHMAN  
NRP. 6007201006**

Dosen Pembimbing I  
Suwarno ST., MSc., Ph.D.

Dosen Pembimbing II  
Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2022**



## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Magister Teknik (M.T.)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**KHALIKUL HAQQUR RAHMAN**

**NRP. 6007201006**

Tanggal Ujian: 15 Juli 2022

Periode Wisuda: September 2022

Disetujui oleh:

**Pembimbing:**

1. Suwarno ST., MSc., Ph.D.  
NIP: 198005202005011003

2. Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.  
NIP: 196303141988031002

**Penguji:**

3. Ika Dewi Wijayanti, ST., M.Sc., Ph.D.  
NIP: 198512022014042002

4. Wahyu Wijanarko, S.T., M.Sc., Ph.D.  
NIP: 198202092012121001

Kepala Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
(INDSYS)



**Atok Setiawan, Ir. MEng.Sc. Dr.**

**NIP. 196604021989031002**



## OPTIMASI PENYIMPANAN ENERGI TERBARUKAN DENGAN BATERAI DAN HIDROGEN DI PULAU BAWEAN

Nama : Khalikul Haqqur Rahman  
NRP : 6007201006  
Pembimbing 1 : Suwarno ST., MSc., Ph.D.  
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.

### ABSTRAK

Pasokan listrik untuk Pulau Bawean, Jawa Timur, Indonesia masih menggunakan PLTD. Operasional dan perawatan PLTD tiap tahunnya mencapai Rp 14,9 Milyar ditambah pajak karbon yang harus dibayarkan akibat emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan setiap tahunnya.

Untuk mengurangi biaya operasional dan pajak emisi CO<sub>2</sub>, maka pada tesis ini akan dirancang sebuah alternatif solusi untuk menurunkan biaya operasi dengan melakukan investasi pembangkit listrik energi terbarukan. Metoda yang digunakan adalah optimasi menggunakan *software matlab-simulink* untuk mencari kombinasi terbaik dari investasi PLTS dan PLTB dengan alternatif penyimpam energi menggunakan baterai atau memanfaatkan PLTD terpasang.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan membangun PLTS berkapasitas 187 kWp dan PLTB berkapasitas 683 kWp serta dengan penyimpanan energi baterai *lead-acid* berkapasitas 1054 kWh investasi sistem pembangkit listrik energi terbarukan ini sebesar Rp 17,7 Milyar dapat menurunkan biaya operasional menjadi Rp 0,61 Milyar, artinya biaya operasional dapat diturunkan sebesar 96%. Selain itu sistem ini juga dapat menurunkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 46902,5 tonCO<sub>2</sub>e/tahun.

**Kata Kunci:** PLTS, PLTB, *lead-acid*, LiFePo<sub>4</sub>, Elektrolisis, *Fuel Cell*, Hidrogen, NPV, PLTD, Emisi CO<sub>2</sub>



## **OPTIMIZATION OF RENEWABLE ENERGY STORAGE WITH BATTERIES AND HYDROGEN ON BAWEAN ISLAND**

Name : Khalikul Haqqur Rahman  
NRP : 6007201006  
Supervisor1 : Suwarno ST., MSc., Ph.D.  
Supervisor 2 : Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.

### ***ABSTRACT***

*The Bawean Island is part of East Java, Indonesia located closed to Java Island, is rely on a diesel generator for its electricity supply. The annual operation and maintenance of diesel generator reaches IDR 14.9 billion plus the carbon tax that must be paid due to the CO<sub>2</sub> emissions produced annually.*

*To reduce operational costs and CO<sub>2</sub> emission taxes, this research will design an alternative solution to reduce operating costs by investing in renewable energy power plants. The method used is optimization using matlab-simulink software to find the best combination of solar power and wind turbine's investments with alternative energy storage using batteries or utilizing installed diesel generator.*

*The simulation results show that by building solar power generator with a capacity of 187 kWp and wind turbine generator with a capacity of 683 kWp and with energy storage of lead-acid batteries with a capacity of 1054 kWh, the investment in this renewable energy power plant system of Rp. 17.7 billion can reduce operational costs to Rp. 0.69 billion, meaning that operational costs can be reduced by 96%. In addition, this system can also reduce CO<sub>2</sub> emissions by 46902.5 tonsCO<sub>2</sub>e/year.*

***Keywords:*** *Solar Generator, Wind Turbine Generator, Lead Acid, LiFePo<sub>4</sub>, Electrolysis, Fuel Cell, Hydrogen, NPV, Diesel Generator, CO<sub>2</sub> Emission*



## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN TESIS .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Tujuan .....	4
<b>BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Topologi Jaringan Kelistrikan .....	5
2.1.1 <i>On-Grid</i> .....	5
2.1.2 <i>Off-Grid</i> .....	5
2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) .....	6
2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).....	7
2.4. Baterai.....	7
2.4.1 <i>State of Charge</i> .....	8
2.5 Produksi Hidrogen.....	9
2.6 <i>Utility-scale Storage Providing Peak Power to Displace On-Island Diesel     Generation [2].....</i>	10
2.7 <i>How Big a Battery? [6] .....</i>	11
2.8 <i>Techno-Economic Analysis of Balancing California’s Power System on a     Seasonal Basis: Hydrogen vs. Lithium-Ion Batteries [7].....</i>	12
2.9 <i>Operation Modelling of Proton Exchange Membrane Electrolyzer with     Metal Hydride Storage [10] .....</i>	15
<b>BAB 3 OPTIMASI PENYIMPANAN ENERGI DARI PLTS DAN PLTB ...</b>	<b>17</b>
3.1 Konfigurasi Sistem .....	17

3.2 Kapasitas PLTS dan PLTB .....	18
3.3 Baterai .....	20
3.4 Produksi Hidrogen dan Oksigen .....	20
3.5 Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi Karbon .....	21
3.6 Optimasi Biaya.....	21
3.6.1 Perhitungan <i>Net Present Value</i> .....	22
3.6.2 Perhitungan <i>Net Present Value (NPV)</i> .....	24
<b>BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS.....</b>	<b>25</b>
4.1 Profil Beban Listrik P. Bawean .....	25
4.1.1 Beban Listrik Elektroliser dan Hasil Listrik pada <i>Fuel Cell</i> .....	25
4.1.2 Profil Beban Listrik P. Bawean .....	27
4.2 Daya dan Kapasitas Pembangkit EBT .....	27
4.2.1 Kapasitas Pembangkit PLTS dan PLTB .....	28
4.2.2 Daya Genset.....	29
4.3 Simulasi Kebutuhan Daya P. Bawean .....	29
4.3.1 Penyusunan Rangkaian Simulink pada Matlab .....	29
4.3.1.1 Rangkaian Simulink PLTS .....	30
4.3.1.2 Rangkaian Simulink PLTB.....	30
4.3.1.3 Baterai.....	31
4.4 Profil Daya dan Beban Simulasi .....	31
4.5 Hasil Simulasi Mode A.....	32
4.5.1 Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode A .....	32
4.5.2 Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode A .....	33
4.5.3 Produksi Emisi CO <sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode A.....	33
4.6 Hasil Simulasi Mode B .....	33
4.6.1 Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode B.....	33
4.6.2 Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode B.....	33
4.6.3 Produksi Emisi CO <sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode B .....	34
4.7 Hasil Simulasi Mode C .....	35
4.7.1 Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode C.....	35
4.7.2 Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode C.....	36
4.7.3 Produksi Emisi CO <sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode C .....	36

4.8 Analisa Biaya Investasi dan <i>Break Event Point</i> .....	37
4.8.1 Analisa Biaya Investasi dan <i>Break Event Point</i> untuk Mode A.....	37
4.8.2 Analisa Biaya Investasi dan <i>Break Event Point</i> untuk Mode B .....	38
4.8.3 Analisa Biaya Investasi dan <i>Break Event Point</i> untuk Mode C.....	39
4.9 Analisa <i>Cash Flow</i> dalam Waktu 15 Tahun.....	40
4.9.1 Analisa NPV dalam Waktu 15 Tahun untuk Mode A.....	40
4.9.2 Analisa NPV dalam Waktu 15 Tahun untuk Mode B .....	41
4.9.3 Analisa NPV dalam Waktu 15 Tahun untuk Mode C .....	42
<b>BAB 5 DISKUSI DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>43</b>
5.1 Emisi CO <sub>2</sub> Harian di Pulau Bawean.....	43
5.2 Kelayakan Keekonomian.....	44
5.3 Simulasi Aliran Daya pada Mode A dengan Skenario 3 .....	45
<b>BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>47</b>
6.1 Kesimpulan.....	47
6.2 Saran .....	48
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>49</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Biaya total generator, emisi CO <sub>2</sub> dan biaya per unit dari emisi .....	12
Tabel 2.2 Hasil Perhitungan LCOE pada Sistem Pembangkit di Amerika .....	14
Tabel 3.1 Spesifikasi modul PLTS.....	18
Tabel 3.2 Spesifikasi unit PLTB .....	18
Tabel 3.3 Mode Sistem Pembangkit .....	19
Tabel 3.4 Skenario perbandingan PLTS dan PLTB.....	19
Tabel 3.5 Spesifikasi baterai .....	20
Tabel 3.6 Nilai biaya investasi .....	22
Tabel 3.7 Biaya operasional dan perawatan.....	23
Tabel 4.1 Hasil Elektrolisa H <sub>2</sub> O pada Suhu 27 OC dan Tekanan 1 ATM .....	25
Tabel 5.1 Heatmap Emisi CO <sub>2</sub> /hari pada tiap Mode dan Skenario .....	43
Tabel 5.2 Heatmap NPV pada tiap Mode dan Skenario .....	44



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Daya pemakaian listrik dalam waktu 24 jam di P. Bawean [8] .....	1
Gambar 1.2. Data radiasi matahari dan kecepatan angin dalam waktu 24 jam di P. Bawean.....	2
Gambar 1.3. Desain Jaringan Listrik dengan EBT Pulau Bawean .....	3
Gambar 2.1 Mode Sistem Kelistrikan <i>On-Grid</i> .....	5
Gambar 2.2 Mode Sistem Kelistrikan <i>Off-Grid</i> .....	6
Gambar 2.3 Model Rangkaian Ekuivalen untuk PEM Tunggal [10].....	9
Gambar 2.4 <i>Flowchart</i> untuk kontrol <i>On-Grid</i> di Pulau <i>Prince Edward</i> .....	10
Gambar 2.5 <i>Flow Chart</i> Pemodelan.....	15
Gambar 2.6 Produksi Hidrogen Berdasarkan Arus yang Masuk pada <i>Electrolyzer</i> .....	16
Gambar 3.1 Perencanaan Konfigurasi Jaringan Listrik di P. Bawean .....	17
Gambar 4.1 Hidrogen Production Rate pada Elektrosilis H <sub>2</sub> O .....	26
Gambar 4.2 Beban Listrik Utilitas P. Bawean dalam Waktu 24 Jam .....	27
Gambar 4.3 Output Daya yang Dihasilkan 100% PLTS dan 100% PLTB.....	28
Gambar 4.4 Kapasitas PLTS dan PLTB pada setiap Skenario .....	29
Gambar 4.5 Rangkaian Simulink pada Matlab .....	30
Gambar 4.6 Rangkaian Simulink PLTS.....	30
Gambar 4.7 Rangkaian Simulink PLTB .....	31
Gambar 4.8 Rangkaian Simulink Baterai.....	31
Gambar 4.9 Daya Output EBT (PLTS+PLTB) pada tiap Skenario .....	32
Gambar 4.10 Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode A.....	32
Gambar 4.11 Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode B .....	34
Gambar 4.12 Produksi Emisi CO <sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode B .....	34
Gambar 4.13 Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode C .....	35
Gambar 4.14 Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode C .....	36
Gambar 4.15 Produksi Emisi CO <sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode C .....	37
Gambar 4.16 Nilai Investasi dan BEP pada tiap Skenario Mode A.....	38
Gambar 4.17 Nilai Investasi dan BEP pada tiap Skenario Mode B.....	39
Gambar 4.18 Nilai Investasi pada tiap Skenario Mode C .....	39
Gambar 4.19 NPV pada tiap Skenario Mode A.....	41

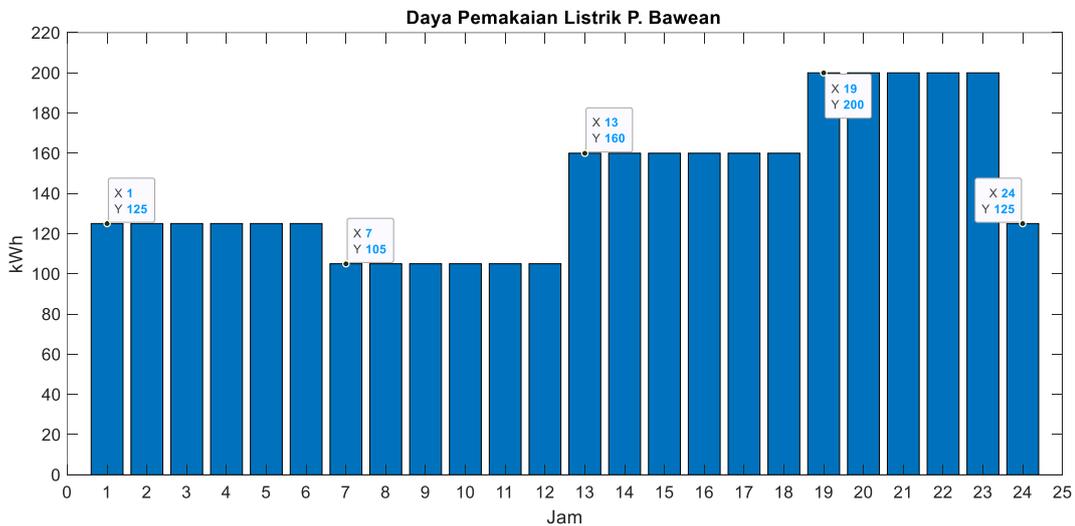
Gambar 4.20 NPV pada tiap Skenario Mode B.....	41
Gambar 4.21 NPV pada tiap Skenario Mode C.....	42
Gambar 5.1 Simulasi Aliran Daya pada Mode A – Skenario 3.....	45

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

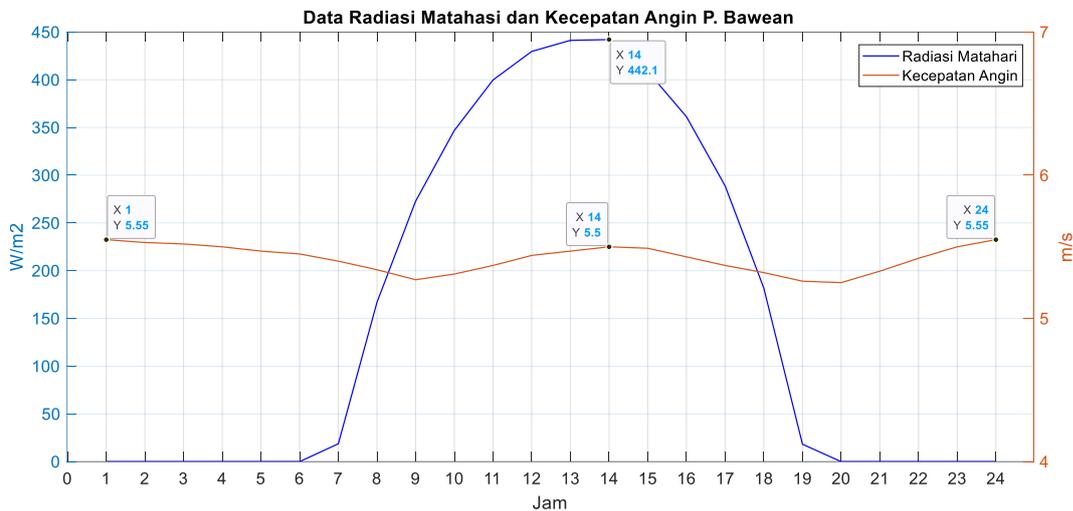
Pulau Bawean masih disuplai dengan PLTD dan PLTMG, dan hal ini membuat biaya operasional sangat tinggi dan polusi karbon yang tinggi, oleh karena itu P. Bawean masuk dalam daftar 200 daerah dedieselisasi tahap 1 yang diresmikan oleh menteri ESDM [1]. Kebutuhan energi di P. Bawean dalam 24 jam ditunjukkan dalam gambar 1.1. Data tersebut diambil pada bulan Januari tahun 2012, dalam sehari P. Bawean membutuhkan daya sebesar 3.465 kWh, dengan beban puncak terjadi pada jam 19:00 sampai jam 23:00 sebesar 200 kWh. Untuk memenuhi kebutuhan ini, P. Bawean selama ini menggunakan suplai energi dari PLTD yang memiliki biaya operasional sebesar Rp 10,8 Milyar/tahun. Dan menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 46902,5 tonCO<sub>2</sub>e/tahun. Untuk mengurangi polusi CO<sub>2</sub> ini dan untuk mendukung 100% energi baru dan terbarukan, maka sumber energi harus dirubah pada sumber energi alternatif.



**Gambar 1.1.** Daya pemakaian listrik dalam waktu 24 jam di P. Bawean [8]

P. Bawean memiliki potensi energi matahari dan turbin angin yang besar. Dari data radiasi matahari, pada siang hari radiasi matahari dapat mencapai 442,1 W/m<sup>2</sup> pada jam 14:00. Dan kecepatan angin di P. Bawean menunjukkan 5,5 m/s

pada jam 01:00 dan 24:00. Dari 2 sumber energi tersebut dapat dihasilkan energi untuk memenuhi kebutuhan P. Bawean dalam waktu 24 jam. Data tersebut diambil dalam jangka waktu satu tahun selama 24 jam tiap hari, jadi data tersebut merupakan data rata-rata harian tiap jam selama satu tahun.

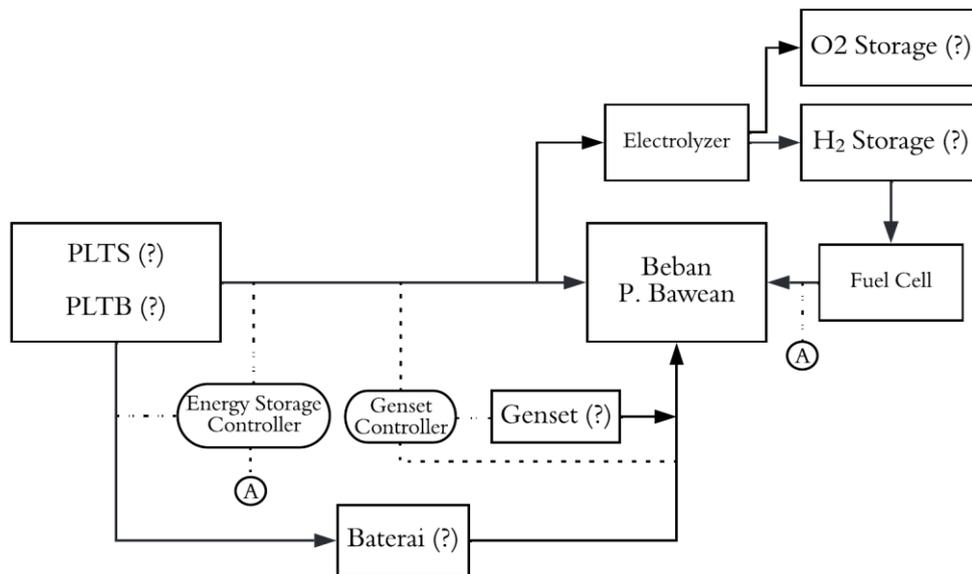


**Gambar 1.2.** Data radiasi matahari dan kecepatan angin dalam waktu 24 jam di P. Bawean

Dilihat dari gambar 1.2. pembangkit listrik matahari dan turbin angin tidak dapat menghasilkan energi secara konstan dalam 24 jam. Oleh karena itu dibutuhkan teknologi penyimpanan energi dalam sistem manajemen energi ini. Penyimpanan energi ini akan memenuhi kebutuhan energi di masyarakat, ketika pembangkit energi dari matahari dan turbin angin tidak dapat memenuhi beban yang diinginkan. Hasil sampingan dari elektrolisis  $H_2O$  adalah hidrogen yang akan disimpan dan digunakan kembali menggunakan *fuel cell* untuk menjadi energi listrik, sedangkan oksigen akan digunakan untuk memenuhi kebutuhan oksigen medis di P. Bawean.

Gambar 1.3. menunjukkan diagram dari aliran energi yang dihasilkan oleh PLTS dan PLTB. Daya yang dihasilkan oleh 2 pembangkit ini akan disalurkan kepada masyarakat. Ketika daya yang dihasilkan PLTS dan PLTB melebihi beban listrik masyarakat, maka daya sisa akan digunakan untuk mengisi baterai. Proses pengosongan baterai akan terjadi pada saat daya yang dihasilkan oleh PLTS dan PLTB tidak mampu memenuhi permintaan masyarakat. Pada jaringan pembangkit ini terdapat genset (PLTD), dimana PLTD ini merupakan *existing* dari pembangkit

yang sudah terpasang saat ini. Penyimpanan energi yang akan digunakan adalah baterai *lead-acid* dan  $\text{LiFePO}_4$ . Dan untuk memenuhi permintaan oksigen medis P. Bawean terdapat elektroliser untuk memecah  $\text{H}_2\text{O}$ , kemudian hidrogen digunakan untuk menghasilkan listrik dengan bantuan *fuel cell*.



**Gambar 1.3.** Desain Jaringan Listrik dengan EBT Pulau Bawean

Pada penelitian ini akan dilakukan optimasi nilai keekonomian pembangkit. Konfigurasi mode dan skenario sistem pembangkit akan menjadi faktor besar kecil nya biaya yang dibutuhkan pembangkit.

## 1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini memiliki beberapa fokus pokok permasalahan yang akan dibahas. Permasalahan yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Menghitung kapasitas PLTS dan PLTB untuk Pulau Bawean.
- Menghitung energi yang dibutuhkan untuk produksi oksigen dan hidrogen, serta energi yang dapat dihasilkan oleh *fuel cell*.
- Menghitung kapasitas baterai dan kapasitas genset yang dibutuhkan.
- Menghitung nilai NPV dan pengurangan emisi  $\text{CO}_2$  tiap konfigurasi.
- Simulasi konfigurasi sistem dalam waktu 24 jam menggunakan *software* Matlab-Simulink 2022a.

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Efisiensi yang digunakan dalam perhitungan ini sebagai berikut:

Deskripsi	Nilai Efisiensi (%)
Efisiensi PLTS:	20,55%
Efisiensi PLTB:	60%
Efisiensi Baterai [18]:	90%
Efisiensi <i>Metal Hydride</i> LaNi <sub>5</sub> -H <sub>2</sub> [10]:	45%

- b. Running pada simulai dilakukan dalam waktu 24 jam.  
c. Data yang digunakan adalah data Pulau Bawean.  
d. Software menggunakan Matlab-Simulink 2022a.  
e. Menggunakan mode *Off-Grid* pada jaringan yang disimulasikan.

### 1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, maka tujuan dari penelitian ini adalah mencari konfigurasi yang paling menguntungkan secara ekonomi dari pengaturan manajemen energi terbarukan dengan penentuan kapasitas optimum dari PLTS, PLTB, Baterai (*lead-acid*/LiFePO<sub>4</sub>) dan PLTD untuk memenuhi kebutuhan listrik harian serta kebutuhan oksigen yang diperlukan di Pulau Bawean. Serta jumlah emisi CO<sub>2</sub> yang dapat dikurangi dengan setiap konfigurasi sistem.

## BAB 2

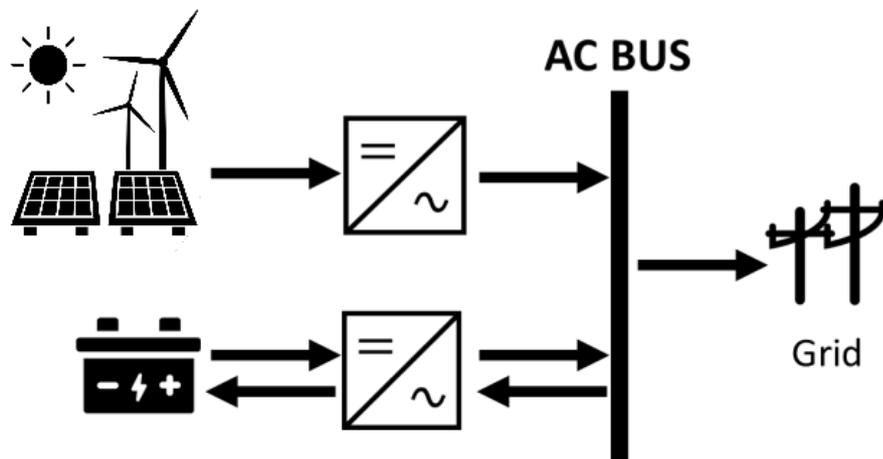
### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1. Topologi Jaringan Kelistrikan

Topologi jaringan listrik merupakan rangkaian jaringan listrik mulai dari sumber listrik hingga beban listrik. Secara umum topologi ini dibagi menjadi 2 mode, yaitu:

##### 2.1.1 *On-Grid*

Mode *On-Grid* merupakan mode operasi jaringan EBT yang terhubung dengan jalur utama pembangkit (dalam hal ini adalah PLN). Jaringan utama pembangkit harian akan menyokong pasokan energi ketika sumber energi dari EBT tidak mampu memenuhi beban puncak dari suatu jaringan, atau sesuai waktu yang telah ditentukan oleh sistem. Dalam kasus penelitian ini, sumber pembangkit PLTS dan PLTB yang dirancang yang telah dipasang penyimpanan energi untuk *smoothing* daya terhubung dengan jaringan PLN.

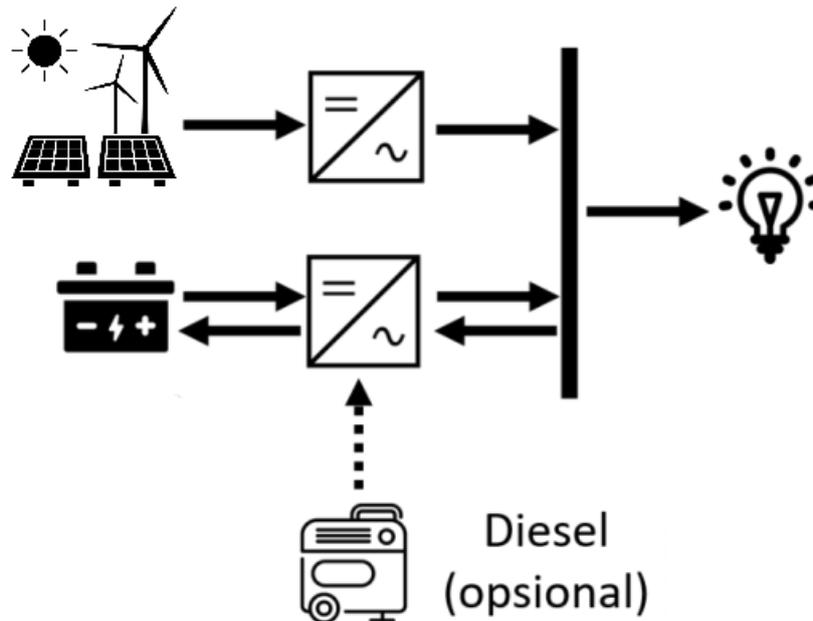


**Gambar 2.1** Mode Sistem Kelistrikan *On-Grid*

##### 2.1.2 *Off-Grid*

Jika mode operasi ini dihubungkan dengan jaringan utama PLN, maka mode *off-grid* berdiri sendiri tanpa mengandalkan jaringan utama (PLN). Pada penelitian ini yang akan digunakan adalah mode *Off-Grid*, dimana pembangkit

listrik EBT (PLTS & PLTB) tidak terhubung dengan jaringan utama PLN. Namun, digunakan teknologi penyimpanan energi (batrei & H2 Storage) sebagai *smoothing* energi, dan dihubungkan genset untuk sumplai energi ketika waktu-waktu kritis terjadi. Semisal ketika PLTS, PLTB dan penyimpanan energi tidak dapat memenuhi permintaan energi dari utilitas masyarakat.



**Gambar 2.2** Mode Sistem Kelistrikan *Off-Grid*

## 2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit sel surya atau biasa disebut panel surya merupakan suatu sistem yang dapat mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Besaran daya yang diubah oleh panel surya sangat bergantung pada intensitas radiasi yang ada dan suhu sekitar yang mempengaruhi kerja sel surya itu sendiri. Kondisi standar ideal radiasi matahari adalah sebesar  $1000\text{W/m}^2$  pada suhu  $25^\circ\text{C}$ . Namun jumlah radiasi dan suhu lingkungan menjadi faktor penentu besar kecilnya daya yang dihasilkan oleh sel surya. Berdasarkan hal ini, dapat diketahui berdasarkan persamaan berikut [11]:

$$\sum_1^{24} P_{PV}(t) = \sum_1^{24} (N_{PV} \times A_{PV} \times \eta_{PV} \times G(t))$$

Keterangan:

- $N_{PV}$  : Jumlah modul panel surya  
 $A_{PV}$  : Luas modul panel surya ( $m^2$ )  
 $\eta_{PV}$  : Efisiensi sistem PLTS  
 $G(t)$  : Radiasi aktual ( $Wh/m^2$ )

### 2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Turbin angin merupakan suatu generator yang memanfaatkan kecepatan angin yang berhembus, sehingga semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin besar pula energi yang dihasilkan oleh generator turbin angin. Untuk mencari tahu kapasitas turbin angin yang akan digunakan, dapat dihitung dengan persamaan berikut [11]:

$$\sum_1^{24} P_{WT} = \sum_1^{24} \frac{v^3(t) - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} \times Pr \times N_{WT}$$

Keterangan:

- $P_{WT}$  = Daya turbin angin (W)  
 $P_r$  = Daya nominal turbin angin (W)  
 $N_{WT}$  = Jumlah turbin angin  
 $v^3(t)$  = Kecepatan angin pada waktu t ( $m/s^2$ )  
 $v_{(ci)}^3$  = Kecepatan angin *Cut In* ( $m/s^2$ )  
 $v_{(r)}^3$  = Kecepatan angin *rated* ( $m/s^2$ )

### 2.4. Baterai

Baterai merupakan suatu alat yang dapat digunakan untuk menyimpan dan melepaskan energi dengan kategori *electrochemical* [3]. Energi ini kemudian disimpan dalam larutan yang terdapat pada baterai untuk jangka waktu yang relatif lama. Ketika energi dibutuhkan, maka energi dalam batrei akan dilepaskan untuk memenuhi kebutuhan listrik peralatan tertentu. Batrei yang digunakan dalam penelitian ini adalah Li-ion, karena merupakan batrei dengan karakteristik yang sangat baik jika dibandingkan dengan batrei jenis lainnya seperti Nas, Flow, Ni-Cd, maupun Lead Acid [3].

Jumlah kapasitas energi yang mampu disimpan oleh sebuah baterai dihitung

dengan satuan Ampere-Jam (Ah). Satuan ini menjelaskan berapa besar arus listrik yang mampu dialirkan oleh baterai selama 1 jam dalam kondisi penuh dan besar jumlah arus yang diperlukan untuk mengisi penuh baterai dari keadaan kosong hingga penuh [5]. Dari kapasitas baterai tersebut dapat diketahui pula energi total yang tersimpan dalam baterai tersebut dengan rumus:

$$\text{Energi Baterai} = v \times Ah \quad (3)$$

Keterangan:

v = Tegangan baterai (Volt)

Ah = Kapasitas baterai

Kemudian, untuk menentukan kemampuan baterai untuk menyimpan energi yang dibutuhkan selama tidak ada daya pembangkitan dari PLTS dan PLTB menggunakan persamaan berikut [4]:

$$\text{Energi Baterai} = \frac{DEC \text{ (Wh)} - \text{Energi langsung (PLTS + PLTB) ke beban}}{\eta_{Bat} \times DOD_{MAX}}$$

Keterangan:

DEC = Daily Energy Consumption (Wh)

$\eta_{Bat}$  = Efisiensi baterai (%)

$DOD_{MAX}$  = Depth of Discharge (%)

#### 2.4.1 State of Charge

*State of Charge* (SOC) merupakan kondisi kapasitas baterai yang secara sederhana dijelaskan sebagai suatu metode perhitungan mengetahui seberapa besar kapasitas pengisian baterai pada waktu tertentu. Kapasitas baterai disimbolkan dengan simbol *Ampere-hour* (Ah) dimana kapasitas baterai akan penuh atau habis dalam satu jam jika digunakan atau *discharge* selama 1 jam. Sebagai contoh misal sebuah baterai dengan kapasitas 10Ah dan *discharge* sebesar 1A. Secara teori baterai tersebut akan habis dalam waktu 10 jam. Nilai SOC pada baterai didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$SOC = \frac{C(t)}{C_{ref}(t)}$$

Keterangan:

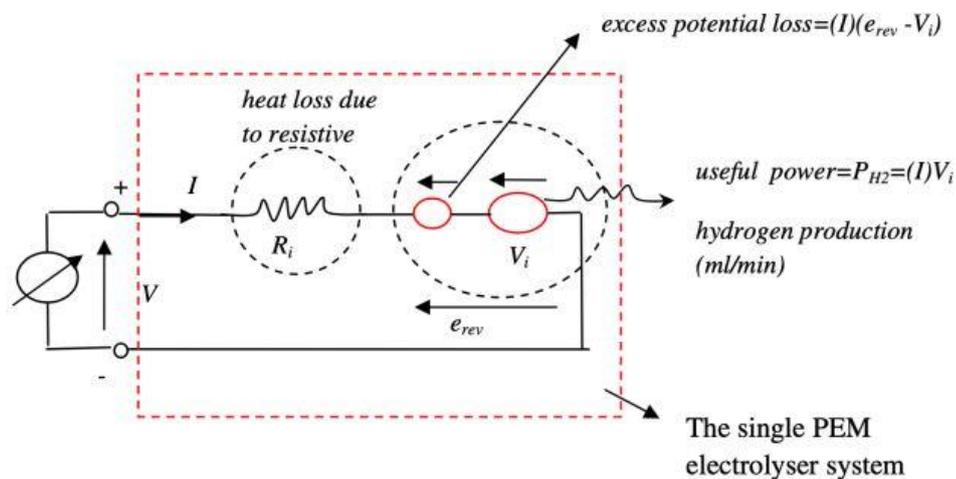
$SOC$  : State of Charge

$C(t)$  : Kapasitas baterai pada waktu t (Ah)

$C_{ref}(t)$  : Kapasitas referensi baterai pada waktu (Ah)

## 2.5 Produksi Hidrogen

*Hydrogen storage* merupakan salah satu media penyimpanan energi yang sedang menarik untuk dianalisa akhir-akhir ini, karena merupakan suatu bentuk penyimpanan energi yang akan sangat potensial dimasa yang akan datang. Hal ini disebabkan karena *Proton Exchanged Membrane (PEM) electrolysis* memiliki kemampuan yang sangat baik untuk beroperasi pada kerapatan arus yang tinggi. Sistem ini sangat cocok jika digabungkan dengan sumber energi yang sangat dinamis seperti PLTS dan PLTB [10].



**Gambar 2.3** Model Rangkaian Ekuivalen untuk PEM Tunggal [10]

Produksi hidrogen dari suatu elektrolisis berbanding lurus dengan arus masuk pada PEM, sehingga dapat dituliskan persamaan seperti berikut:

$$v_H = \left(\frac{RT}{p}\right) \frac{I}{2F}$$

Keterangan:

$v_H$  : Volume produksi hydrogen

R : Konstanta gas Hidrogen

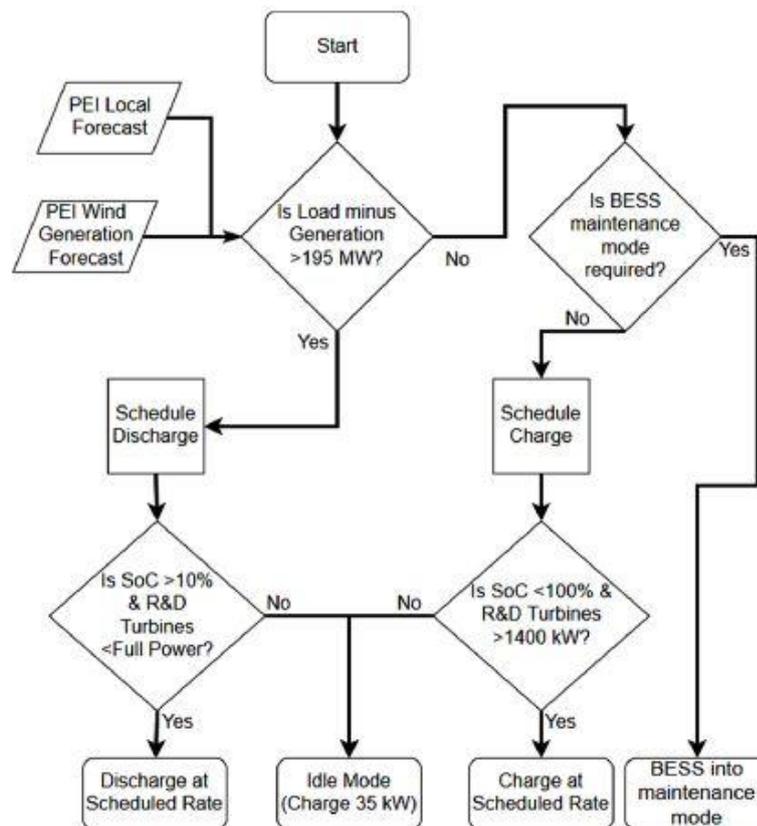
T : Suhu gas hidrogen

p : Tekanan gas hidrogen

I : Arus

F : Konstanta Faraday

## 2.6 Utility-scale Storage Providing Peak Power to Displace On-Island Diesel Generation [2]



**Gambar 2.4** Flowchart untuk kontrol *On-Grid* di Pulau *Prince Edward*

Pada penelitian ini, David Watson, dkk mengambil objek penelitian pada Pulau *Prince Edward* (PEI) di Kanada, Pulau tersebut telah terpasang turbin angin, dan 40% dari kebutuhan energi listrik pulau tersebut didapat dari turbin angin tersebut. Dan menggunakan generator diesel sebagai cadangan ketika beban

puncak di Pulau *Prince Edward* terjadi. Penelitian ini bermaksud untuk memasang baterai sebagai penyimpanan energi yang dapat digunakan ketika beban puncak terjadi untuk menggantikan generator diesel. Dalam penelitian ini dijelaskan tentang efisiensi, ketersediaan dan jumlah beban puncak yang dapat disediakan oleh baterai. Selain itu penelitian ini juga membahas perbandingan biaya yang dibutuhkan antara sistem yang sudah ada dengan sistem yang menggunakan baterai sebagai penyimpanan energi. Pada gambar 2.4 dapat dilihat diagram alir dalam proses *on-grid* penyimpanan energi yang akan dijalankan di PEI. Ketika beban PEI dikurangi energi turbin angin bernilai lebih besar dari pada 195 MW, maka BESS akan bersiap untuk mode *discharging*, dan akan bersiap untuk mode *charging* ketika memiliki nilai sebaliknya. *Discharging* baterai akan dilakukan ketika SoC baterai lebih dari 10% dan turbin angin berada pada daya optimalnya. *Charging* baterai akan dilakukan ketika SoC baterai kurang dari 100% dan turbin angin menghasilkan daya lebih dari 1400 kW. Namun jika tidak memenuhi persyaratan yang sudah ditentukan, maka sistem akan berada pada mode idle (*Charging* dengan 35kW). Dalam penelitian ini dapat diketahui bahwa sistem penyimpanan energi dapat memenuhi periode puncak yang terjadi di Pulau *Prince Edward*. Namun sayangnya dengan 2 MWh kapasitas baterai yang digunakan hanya dapat mensuplai 1 MW, dan tidak dapat menghindari penggunaan generator diesel. Karena pendapatan hanya 9% dari total biaya BESS, sistem penyimpanan energi untuk menggantikan generator diesel masih butuh kajian ulang. Modal untuk sistem penyimpanan energi akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya jumlah penggunaan sistem penyimpanan energi, hal ini akan membuat pengaplikasian penyimpanan energi semakin nyata.

## **2.7 How Big a Battery? [6]**

G. Cornelis van Kooten, dkk melalui jurnal penelitiannya membahas seberapa besar kebutuhan baterai untuk digunakan berdampingan dengan energi terbarukan (EBT) yang memiliki karakter naik turun dari energi yang dapat dihasilkan, bergantung pada kondisi lingkungan, seperti pada PLTS dan PLTB. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi menggunakan 100% energi terbarukan dari angin dan matahari pada sistem kelistrikan di Alberta yang

masih bergantung pada bahan bakar fosil.

Model yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari energi terbarukan dan energi konvensional. Dari data energi yang ada pada tahun 2017, kemudian di simulasikan untuk memprediksi yang akan dibutuhkan di masa depan berdasarkan kapasitas energi terbarukan yang akan terealisasi. Dalam penelitian ini digunakan digunakan 3 skenario, yaitu: RNEW (Skenario untuk menentukan ukuran baterai jika permintaan dipenuhi hanya dengan sumber energi terbarukan), CAP (Skenario dimana pembangkit batu bara dihilangkan dengan dua pertiga kapasitas diganti dengan kapasitas angin dan surya), GEN (Skenario dimana pembangkit batu bara dihilangkan dengan dua pertiga pembangkit sebelumnya berasal dari energi terbarukan).

**Tabel 2.1** Biaya total generator, emisi CO<sub>2</sub> dan biaya per unit dari emisi

Item	RNEW	CAP	GEN
Total cost (\$ millions)	17,618,021	5562	6671
Carbon released (Mt CO <sub>2</sub> )	-	26.13	21.21
Cost of policy (\$ millions)	17,612,555	96.1	1181.8
Emission-reduction cost (\$/tCO <sub>2</sub> )	363,896	4.31	43.13

Dari tabel 2.1 hasil analisa dari penelitian ini dapat diketahui bahwa baterai masih belum dapat menjadi cara yang efektif dan efisien dalam memfasilitasi energi terbarukan di Alberta. Biaya dari 550 MW baterai dikeluarkan sangat tinggi. Namun secara analitis, ukuran baterai untuk menghilangkan penggunaan bahan bakar batu bara dapat terealisasi.

## ***2.8 Techno-Economic Analysis of Balancing California's Power System on a Seasonal Basis: Hydrogen vs. Lithium-Ion Batteries [7]***

Sumber energi terbarukan sangat dibutuhkan untuk mendukung pengurangan karbon secara signifikan. Karena sifat energi terbarukan adalah intermiten, maka sulit untuk dilakukan integrasi secara langsung kedalam suatu jaringan. Maka dari itu dibutuhkan energi penyimpanan seperti baterai *Lithium-*

*Ion (LI)* dan *Hydrogen-Fired Gas Turbine (HFGT)*. Penelitian ini mencari metodologi untuk estimasi *Levelized Cost of Energy (LCOE)*.

Untuk mengetahui nilai LCOE daya listrik yang dihasilkan melalui HFGT dan LI berdasarkan profil operasional turbin gas di Amerika pada tahun 2019. Untuk menghitung biaya LCOE Drake D. Hernandez, dkk menggunakan persamaan dasar sebagai berikut:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

$n$  = *Lifetime of the system*

$I_t$  = *Investment expenditures in year t*

$M_t$  = *Operations and maintenance expenditures year t*

$F_t$  = *Fuel expenditures in year t*

$E_t$  = *Electricity generation in year t*

Untuk memastikan bahwa perbandingan antara baterai HFGT dan LI sesuai, kami membuat asumsi umum berikut:

- Umur instalasi proyek yang terpasang adalah 15 tahun.
- Tingkat diskon untuk setiap proyek terpasang adalah 10%.

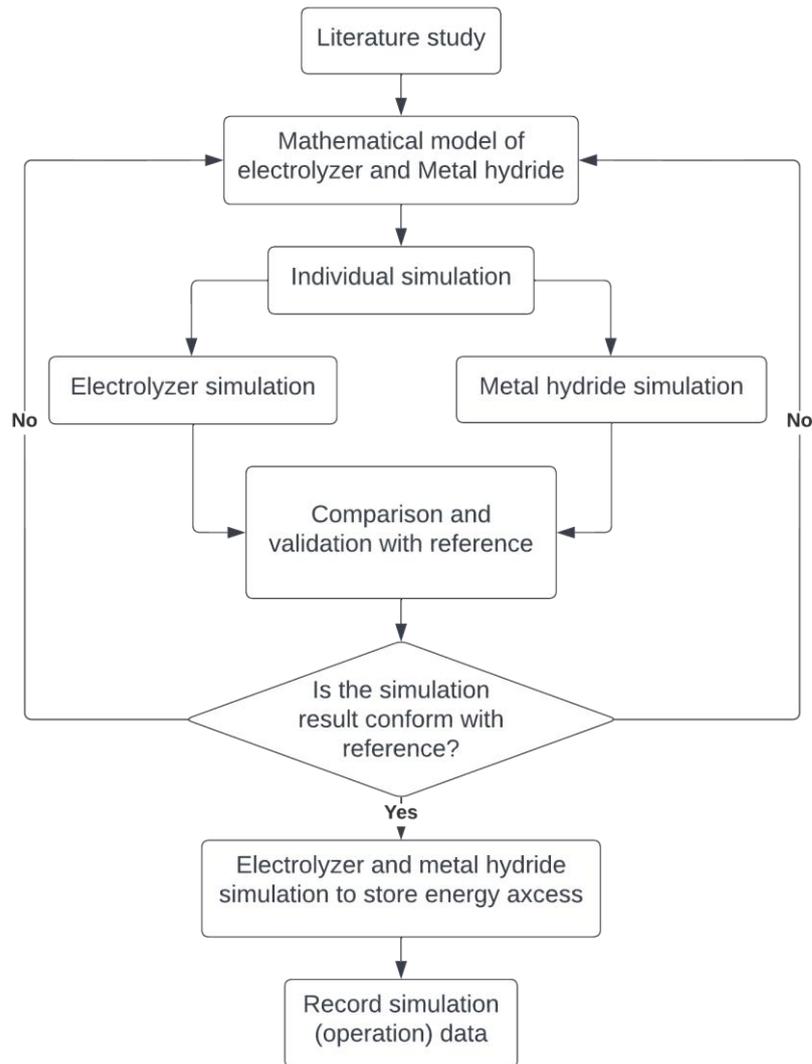
**Tabel 2.2** Hasil Perhitungan LCOE pada Sistem Pembangkit di Amerika

<b>Plant Name</b>	<b>HFGT</b>	<b>LI</b>
<b>Unit</b>	<b>(\$/MWh)</b>	<b>(\$/MWh)</b>
Almond	1129	362
Badger Creek Cogeneration	1472	1447
Bear Mountain Cogeneration	1100	622
Canyon Power Plant	180	332
Carlsbad Energy Center	1344	385
Carson Ice Cogeneration CT	2223	2239
Chalk Cliff Cogeneration	1709	2045
CPV Sentinel Energy Project	1152	319
Grayson CT	1626	1176
Hanford Energy Park Peaker	2711	1914
Harbor CT	4142	4523
Haynes (Unit 5 & 6) Repowering Project	1181	379
Henrietta Peaker Project	1597	669
Live Oak Cogeneration	1431	1386
Malaga Power Plant (Kings River)	2356	2504
Mariposa Peaker Project	1416	450
Marsh Landing Generating Station	3629	2909
McKittrick Cogeneration	1405	1328
MillerCoors Irwindale Brewery CT Plant	1724	3296
Miramar Energy Facility	1191	555
Oakland	11,385	14,423
Pebble Beach CT	1997	18,959
Procter & Gamble CT	1249	716
Redding Power	9289	11,462
Ripon Mill	2667	3801
Scattergood Repowering CT	1295	616
Valley (Los Angeles) CT	4459	6052

Perhitungan LCOE untuk setiap sistem mengikuti formulasi yang ditetapkan pada 2.1, input yang digunakan untuk menghitung LCOE bervariasi berdasarkan sistem. Misalnya, konsumsi bahan bakar tahunan untuk HFGT dihitung sebagai total biaya yang terkait dengan pembelian hidrogen untuk mengoperasikan fasilitas, sedangkan konsumsi bahan bakar tahunan untuk LI sama dengan total biaya daya listrik yang disimpan dalam sistem (dalam penelitian ini diasumsikan menjadi nol berdasarkan harga listrik \$0/MWh). Dari hasil yang disajikan pada

tabel 2.2 dapat dilihat 10 dari 29 pembangkit lebih hemat menggunakan HFGT daripada LI.

### 2.9 Operation Modelling of Proton Exchange Membrane Electrolyzer with Metal Hydride Storage [10]

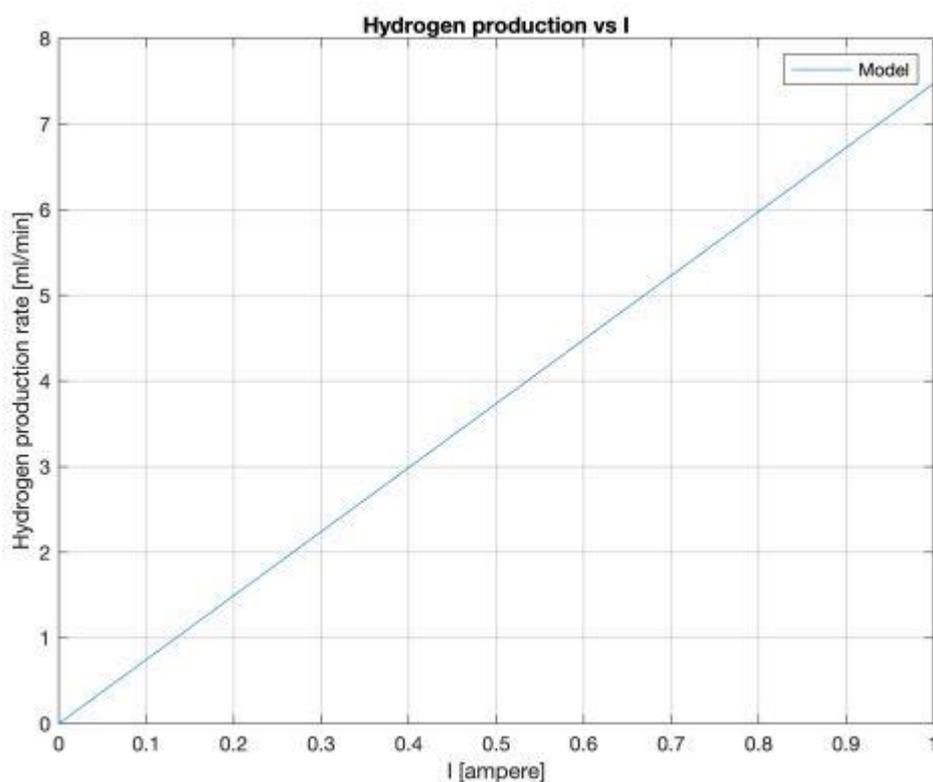


**Gambar 2.5** Flow Chart Pemodelan

Menurut Arif Hariyadi, kebutuhan akan teknologi penyimpanan semakin tinggi seiring berkembangnya sumber energi terbarukan digunakan. Dalam skala kecil, biasanya baterai digunakan sebagai sumber energi ketika beban puncak

terjadi. Namun baterai memiliki kekurangan dalam *self-discharging* ketika waktu penyimpanan relatif lama, metal hibrida merupakan salah satu alternatif penyimpanan energi yang menawarkan kapasitas tinggi dan resiko operasi yang rendah. Dan penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan sistem *Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer* dan penyimpanan hydrogen Metal Hibrida dengan menggunakan *software* Matlab. Pada gambar 2.5 merupakan diagram alir dari proses penelitian ini dilakukan.

Dari penelitian yang dilakukan oleh Arif dapat diketahui bahwa produksi hydrogen berbanding lurus dengan input arus yang diberikan pada *electrolyzer* seperti yang terlihat pada gambar 2.6. Sistem *electrolyzer* logam hibrida dapat digunakan untuk memproduksi dan menyimpan hydrogen dari daya yang berlebih selama 2 hari operasi, dan hydrogen tersebut dapat disimpan dalam jangka waktu yang panjang.



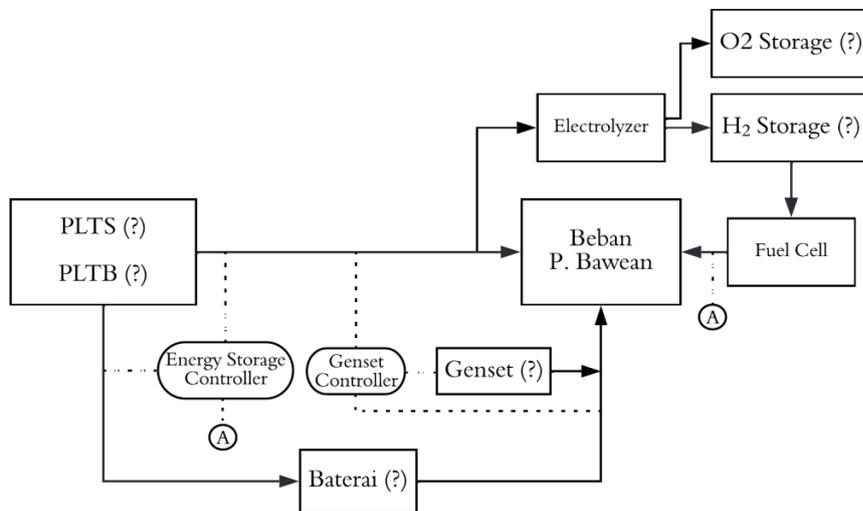
**Gambar 2.6** Produksi Hidrogen Berdasarkan Arus yang Masuk pada *Electrolyzer*

## BAB 3

### OPTIMASI PENYIMPANAN ENERGI DARI PLTS DAN PLTB

#### 3.1 Konfigurasi Sistem

Topologi jaringan yang akan digunakan dalam penelitian ini menggunakan sistem *off-grid*. Kemudian hal selanjutnya yang akan dilakukan adalah menentukan susunan konfigurasi sistem jaringan, konfigurasi ini dimulai dari energi yang dihasilkan oleh EBT hingga mencapai utilitas.



**Gambar 3.1** Perencanaan Konfigurasi Jaringan Listrik di P. Bawean

Pada gambar 3.1 menunjukkan aliran daya yang dihasilkan oleh PLTS dan PLTB menuju utilitas. Jika daya yang dihasilkan oleh PLTS dan PLTB melebihi atau sama dengan beban utilitas, maka daya akan langsung disalurkan menuju utilitas masyarakat. Elektrolisa  $H_2O$  akan menjadi beban tambahan pada sistem, dimana beban elektrolisa ini akan ditambahkan ketika siang hari, hal ini dikarenakan daya output paling besar yang dapat dihasilkan PLTB dan PLTS adalah pada siang hari. Lalu  $H_2$  yang dihasilkan akan langsung diubah ke dalam bentuk listrik Kembali pada malam hari. Oksigen sebagai hasil sampingan elektrolisis akan digunakan untuk suplai oksigen medis yang dibutuhkan.

### 3.2 Kapasitas PLTS dan PLTB

Variabel utama yang akan mempengaruhi kapasitas baterai adalah kapasitas PLTS dan PLTB. Dan pertimbangan dalam menentukan kapasitas PLTS dan PLTB yang akan digunakan adalah beban dari P. Bawean serta biaya yang rendah. Dalam penelitian ini kapasitas PLTS dan PLTB akan divariasikan untuk mendapatkan penyimpanan energi paling optimal dan biaya paling rendah. Untuk modul sel surya yang akan digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

**Tabel 3.1** Spesifikasi modul PLTS

Pmax (Wp)	Voc (v)	Vmpp (v)	Isc (A)	Impp (A)	Efisiensi (%)	Dimensi (m)	Harga/Modul
530	49,26	40,56	13,71	13,07	20,55	2,274 x 1,134	Rp 4.300.000,00

Dari gambar 1.1 dan gambar 1.2 dapat diketahui nilai  $N_{PV} \times A_{PV}$  PLTS yang akan digunakan sebagai nilai konstan yang dibutuhkan untuk memenuhi daya utilitas P. Bawean dalam waktu 24 jam.

$$N_{PV} \times A_{PV} = \frac{\sum_1^{24} P_{PV}}{\eta_{PV} (\sum_1^{24} G(t))}$$

$$N_{PV} \times A_{PV} = 4476,6$$

Dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa jumlah modul yang akan digunakan adalah 1768 buah, dan PLTS memiliki kapasitas total sebesar 937 kWp.

Kemudian untuk spesifikasi PLTB yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.2** Spesifikasi unit PLTB

P rated (kW)	D rotor (m)	H rotor (m)	A wt (m <sup>2</sup> )	V rated (m/s)	Vci/Vco (m/s)	Harga/Unit
100	29	28	600	9	3,5/20	Rp 1.131.000.000,00

Dari gambar 1.1 dan gambar 1.2 dapat diketahui nilai  $N_{WT} \times P_r$  PLTB yang akan digunakan sebagai nilai konstan yang dibutuhkan untuk memenuhi daya utilitas P. Bawean dalam waktu 24 jam.

$$\sum_1^{24} P_{WT} = \sum_1^{24} \frac{v^3(t) - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} \times Pr \times N_{WT}$$

$$Pr \times N_{WT} = \frac{\sum_1^{24} P_{WT}}{\sum_1^{24} \frac{v^3(t) - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}}$$

$$Pr \times N_{WT} = 853858,9$$

Dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa jumlah unit PLTB yang akan digunakan sebanyak 9 buah, dan PLTB memiliki kapasitas total sebesar 900 kWp.

Dari kapasitas maksimal PLTS dan PLTB yang telah diketahui, akan dilakukan 3 mode konfigurasi pembangkitan berdasarkan:

**Tabel 3.3** Mode Sistem Pembangkit

Mode	Deskripsi
A	Seluruh sistem menggunakan EBT (PLTS, PLTB dan Baterai)
B	Baterai pada system EBT diganti dengan PLTD (350 kWh)
C	Sistem EBT ditambah PLTD hidup pada beban puncak (7 p.m. – 11 p.m.)

Dan untuk mencari keuntungan tertinggi pada 3 mode pada tabel 3.3, akan dilakukan skenario perbandingan pembangkitan PLTS dan PLTB. Skenario yang akan dilakukan untuk perbandingan PLTS dan PLTB adalah seperti berikut:

**Tabel 3.4** Skenario perbandingan PLTS dan PLTB

Skenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
PLTS	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PLTB	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%

Optimasi sensitivitas pada sistem ini akan menjadikan 2 jenis baterai yang berbeda, yaitu Lead Acid dan LiFePo<sub>4</sub> untuk mengetahui penyimpanan energi yang paling relevan yang dapat digunakan pada saat ini di P. Bawean.

### 3.3 Baterai

Spesifikasi baterai yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.5** Spesifikasi baterai

Material	V rated (volt)	Kapasitas (Ah)	Life Cycle	DoD Cycle (%)	Dimensi (m) PxLxT	Berat (kg)	Harga/Unit (Rp)
LiFePo <sub>4</sub>	48	100	4000	90	0,41x0,44x0,225	51	29.400.000,00
Lead Acid	12	200	4000	40	0,52x0,24x0,222	57,2	4.500.000

Dengan mode pembangkit dan skenario perbandingan PLTS dan PLTB yang dilakukan, maka pada tahap ini akan didapatkan kapasitas baterai dengan persamaan berikut [4]:

$$\text{Energi Baterai} = \frac{\text{DEC (Wh)} - \text{Energi langsung (PLTS + PLTB) ke beban}}{\eta_{\text{Bat}} \times \text{DOD}_{\text{MAX}}}$$

Dari kapasitas baterai yang telah didapatkan, dapat diketahui pula biaya investasi dari baterai, sehingga didapatkan pula biaya investasi baterai yang diperlukan dalam setiap mode dan skenario.

### 3.4 Produksi Hidrogen dan Oksigen

Sesuai dengan diagram aliran daya pada gambar 3.1, beban listrik pada proses elektrolisa menjadi beban listrik tambahan pada tiap harinya, yaitu sebesar yang dibutuhkan untuk menghasilkan oksigen yang dibutuhkan oleh rumah sakit. Dan hydrogen yang dihasilkan juga langsung dirubah kembali dengan *fuel cell* untuk menghasilkan listrik Kembali pada malam harinya. Jika ditinjau dari kondisi RSUD P. Bawean yang memiliki kapasitas 50 tempat tidur, maka jumlah kebutuhan oksigen pada saat rumah sakit penuh dan seluruhnya membutuhkan terapi oksigen, yaitu sebanyak 1,25 m<sup>3</sup>/hari [15]. Kemudian akan dilakukan simulasi perhitungan melalui *Matlab*, untuk menentukan rating volume produksi hidrogen tiap menitnya.

### 3.5 Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi Karbon

Karena pada sistem masih digunakan PLTD *existing* P. Bawean. Maka akan ada konsumsi bahan bakar dan emisi karbon yang akan terjadi. Untuk perhitungan konsumsi bahan bakar dapat diketahui dengan persamaan [11]:

$$F_g = A_g \times P_{ng} + B_g \times P_g$$

$$F_g = \text{Konsumsi Bahan Bakar (L)}$$

$$P_{ng} = \text{Output Power Diesel (kW)}$$

$$P_g = \text{Nominal Power Diesel (kW)}$$

$$A_g = 0,246 \text{ L/kWh}$$

$$B_g = 0,0845 \text{ L/kWh}$$

Dari volume bahan bakar yang dikonsumsi oleh PLTD, dapat diketahui emisi karbon yang dihasilkan. Untuk mengetahui jumlah emisi karbon yang dihasilkan oleh PLTD dengan menggunakan persamaan berikut [17]:

$$E_{CO_2} = F_{BBM} \times \rho \times C_{ar} \times FO \times \frac{44}{12} \times 10^{-3}$$

$$E_{CO_2} = \text{Total emisi BBM (ton CO}_2\text{)}$$

$$F_{BBM} = \text{Jumlah konsumsi BBM (kilo Liter)}$$

$$FO = \text{Faktor Oksidasi (99\%)}$$

$$\rho = \text{Berat jenis BBM (910 kg/m}^3\text{)}$$

$$C_{ar} = \text{Kandungan karbon (86\%)}$$

$$10^{-3} = \text{Unit konversi}$$

$$44 = \text{Berat molekul CO}_2$$

$$12 = \text{Berat atom C}$$

### 3.6 Optimasi Biaya

Pada penelitian ini, untuk menentukan umur dari suatu proyek menggunakan asumsi *Break Event Pint (BEP)* terlama dari seluruh konfigurasi mode dan skenario yang dijalankan dan dilakukan pendekatan waktu untuk mempermudah perhitungan. Untuk mendapatkan BEP dari proyek penelitian ini, menggunakan persamaan berikut:

$$BEP = \frac{I_{PLTS} + I_{PLTB} + I_{Baterai}}{Load\ P.\ Bawean\ 24\ jam\ x\ 365\ x\ Rp\ 2.800,00}$$

*BEP = Break Event Point (Tahun)*

*I<sub>PLTS</sub> = Investasi untuk PLTS (Rupiah)*

*I<sub>PLTB</sub> = Investasi untuk PLTB (Rupiah)*

*I<sub>Baterai</sub> = Investasi untuk Baterai (Rupiah)*

*Rp 2.800,00 = Nilai harga tarif listrik per kWh*

Dengan menggunakan optimasi linier sistem akan menghitung dan mendapatkan hasil optimal dengan nilai keuntungan terbesar yang dapat dihasilkan dalam waktu yang dapat diaplikasikan pada setiap skenario dan mode yang dilakukan.

### 3.6.1 Perhitungan *Net Present Value*

Untuk melakukan perhitungan NPV, dibutuhkan biaya arus kas tiap tahunnya selama umur proyek (15 tahun).

#### a. Biaya investasi

Biaya investasi pada penelitian ini adalah:

**Tabel 3.6** Nilai biaya investasi

Unit	Harga/buah (Rp)	Jumlah kebutuhan unit (buah)	Total Harga (Rp)
<b>PLTS</b>	Rp 4.300.000,00	TBA	TBA
<b>PLTB</b>	Rp 1.131.000.000,00	TBA	TBA
<b>LiFePo<sub>4</sub></b>	Rp 29.400.000,00	TBA	TBA
<b>Lead Acid</b>	Rp 4.500.000,00	TBA	TBA
<b>PLTD</b>	-	-	-

(\*Ditulis TBA, karena jumlah kebutuhan unit nya tergantung skenario)

#### b. Biaya pendapatan

Untuk pendapatan harian pada penelitian ini pada setiap mode dan skenario memiliki nilai yang sama. Hal ini karena asumsi konsumsi listrik harian P. Bawean setiap harinya sama, yaitu 3474,66 kWh/hari. Dengan

asumsi harga listrik adalah sebesar Rp 2.800,00/kWh (berdasarkan biaya produksi energi dengan PLTD), maka dalam 1 tahun pendapatan proyek ini adalah sebesar Rp 3.551.101.420,00 (3,5 Miliar).

**c. Biaya operasional dan perawatan**

Berdasarkan *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, biaya operasional dan perawatan dinyatakan sebagai berikut:

**Tabel 3.7** Biaya operasional dan perawatan

Unit	Kapasitas	Biaya (Rp/kW-tahun)
PLTS [19]	< 10kW	Rp 290.000,00
	10kW – 10MW	Rp 145.000,00
PLTB [19]	< 10kW	Rp 580.000,00
	10kW – 10MW	Rp 435.000,00
Baterai [18]	>1 MW	Rp 145.000,00
PLTD [19]	100kW-1000kW	Rp 200.000,00

**d. Biaya pergantian baterai**

$$Umur\ Baterai = \frac{DoD\ Cycle * Life\ Cycle\ Battery}{EB_{Out}}$$

$$DoD\ Cycle = Depth\ of\ Discharge\ [18]$$

$$Life\ Cycle\ Battery = 4000\ Cycle\ [18]$$

$$EB_{OUT} = Energi\ baterai\ yang\ digunakan\ (\%)$$

baterai yang digunakan adalah baterai LiFePo<sub>4</sub> dan Lead Acid yang memiliki 4000 siklus hidup dengan nilai DoD 90% dan 40% [18], maka baterai yang digunakan pada perhitungan penelitian ini memiliki umur 13,7 tahun, sehingga dalam waktu 13,7 tahun harus ada pergantian baterai. Biaya pergantian baterai selama umur proyek (15 tahun) terjadi sekali, dengan biaya pergantian sebesar biaya investasi awal baterai.

**e. Biaya bahan bakar**

Harga bahan bakar yang digunakan adalah sebesar Rp 5.150,00/Liter per tanggal 8 Juli 2022.

**f. Biaya pajak karbon**

Berdasarkan Kementerian Keuangan Republik Indonesia (Kemenkeu RI) pertanggal 2 Desember 2021, piloting perdagangan karbon di sektor pembangkit oleh Kementerian ESDM dengan harga Rp 30.000,00/tCO<sub>2</sub>e.

**3.6.2 Perhitungan *Net Present Value (NPV)***

Sebagai indikator layak atau tidaknya proyek ini dijalankan, maka harus mengetahui bagai mana proyeksi keuntungan proyek ini selama umur proyek yang ditentukan. Untuk menentukan nilai keuntungan suatu proyek, peneliti menggunakan analisa NPV seperti pada persamaan berikut:

$$NPV = \sum_{n=1}^{Nproj} \left( \left( \frac{C_n}{(1+i)^n} \right) - C_0 \right)$$

*NPV = Net Present Value (Rupiah)*

*C<sub>n</sub> = Arus kas per tahun pada periode n (Rupiah)*

*C<sub>0</sub> = Nilai investasi awal (Rupiah)*

*i = Suku bunga kredit korporasi (8,05%)*

Dalam menentukan baik atau tidaknya nilai NPV yang didapatkan, harus menggunakan ketentuan sebagai berikut:

- NPV > 0 → Proyek layak dijalankan, karena Ketika tahun ke-n proyek mendatangkan profit
- NPV = 0 → Proyek masih perlu dianalisa ulang, karena tidak mendatangkan profit maupun kerugian.
- NPV < 0 → Proyek tidak layak dijalankan, karena Ketika tahun ke-n proyek akan rugi.

## BAB 4

### SIMULASI DAN ANALISIS

#### 4.1 Profil Beban Listrik P. Bawean

Seperti yang telah ditampilkan pada bab sebelumnya, P. Bawean memiliki nilai kebutuhan listrik yang berbeda selama 24 jam sesuai dengan kebutuhan masyarakat. Dan pada penjelasan bab ini akan ada perubahan nilai daya yang dibutuhkan di P. Bawean akibat dari dimasukkannya proses elektrolisa H<sub>2</sub>O menjadi H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> medis yang dibutuhkan di P. Bawean.

##### 4.1.1 Beban Listrik Elektroliser dan Hasil Listrik pada *Fuel Cell*

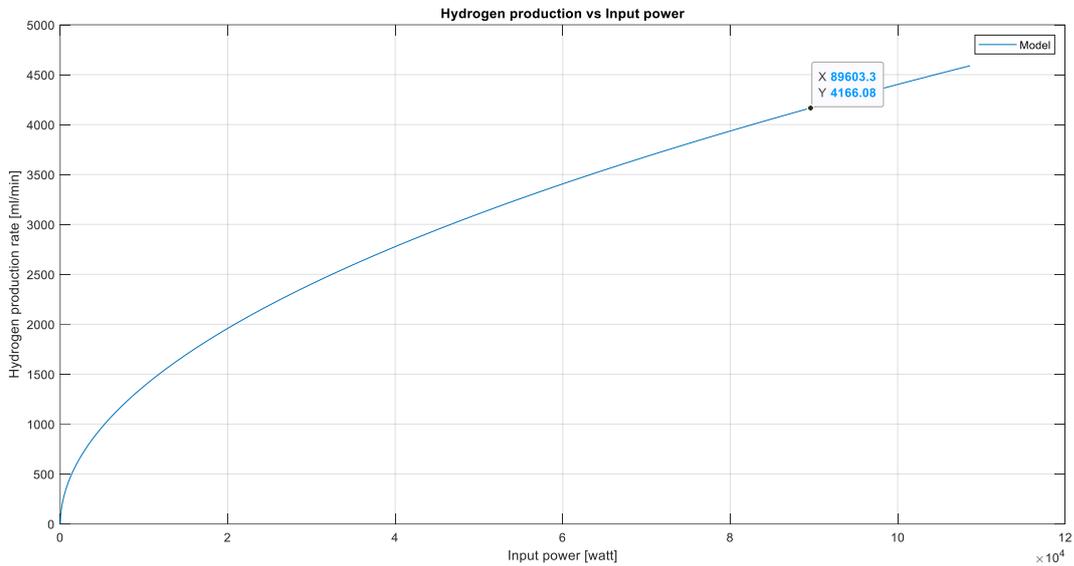
Karena eletroliser H<sub>2</sub>O menjadi H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> harus bekerja setiap hari untuk memenuhi kebutuhan harian oksigen medis P. Bawean, maka beban listrik elektroliser tersebut dimasukkan pada kebutuhan listrik harian P. Bawean. Elektroliser ini bekerja hanya pada siang hari selama 10 jam, yaitu mulai dari jam 8 a.m. sampai pada jam 6 p.m. Hal ini dimaksudkan untuk meminimalisir kapasitas baterai yang dibutuhkan, karena pada siang hari akan PLTS akan bekerja optimal.

Karena untuk mendapatkan volume harian oksigen yang dibutuhkan sebesar 1,25m<sup>3</sup> (1250L), maka dari hasil simulasi elektrolisa H<sub>2</sub>O dapat diketahui data sebagai berikut:

**Tabel 4.1** Hasil Elektrolisa H<sub>2</sub>O pada Suhu 27 °C dan Tekanan 1 ATM

Volume Oksigen:	1250 L
Volume Hidrogen:	2500 L
Massa Oksigen:	1,63 kg
Massa Hidrogen:	0,203 kg

Jika dilihat berdasarkan simulasi tingkat produksi hidrogen pada suhu kamar (25°C) dan tekanan 1 atm menggunakan *software matlab*, maka dapat diketahui sebagai berikut [10]:

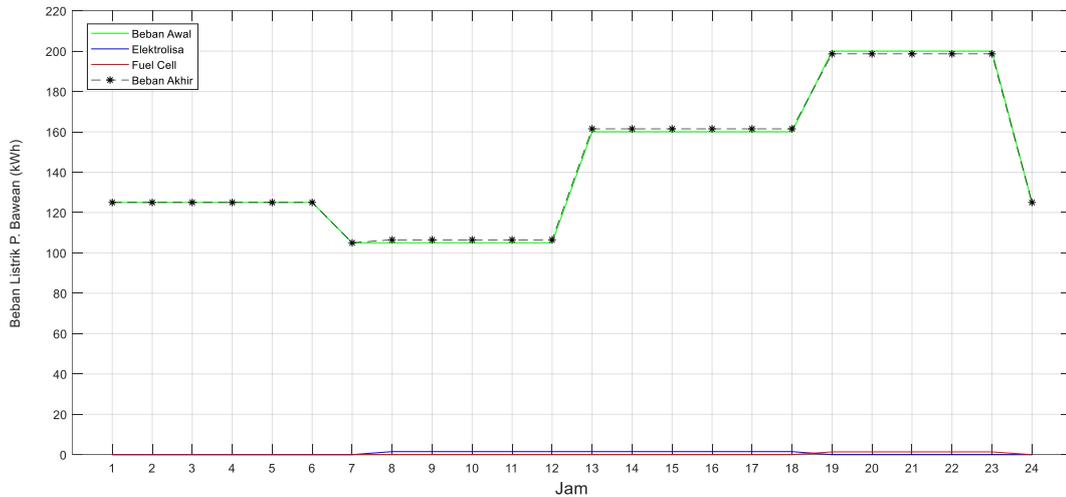


**Gambar 4.1** Hidrogen *Production Rate* pada Elektrosilis H<sub>2</sub>O

Dari gambar 4.1 dapat diketahui bahwa dengan *production rate* hidrogen 2083,33 ml/min (selama 10 jam), proses elektrolisis H<sub>2</sub>O membutuhkan daya sebesar 89603 W tiap menit nya. Yang artinya selama 1 jam membutuhkan daya 14,93 kW. Beban listrik tambahan dari elektroliser ini akan dimasukkan pada beban listrik siang hari di P. Bawean, maka profil beban listrik di P. Bawean akan berubah.

Kemudian dari tabel 4.1 dapat diketahui bahwa hidrogen yang dihasilkan seberat 0,203 kg. Besar energi yang terkandung dalam setiap kg pada temperatur kamar dan tekanan 1 atm adalah sekitar 120 MJ, atau sekitar 33,3 kWh. Listrik yang dapat dihasilkan dari 0,203 kg pada *fuel cell* adalah sebesar 6,768 kWh. Maka efisiensi dari penyimpanan hidrogen ini sebesar 45%.

### 4.1.2 Profil Beban Listrik P. Bawean



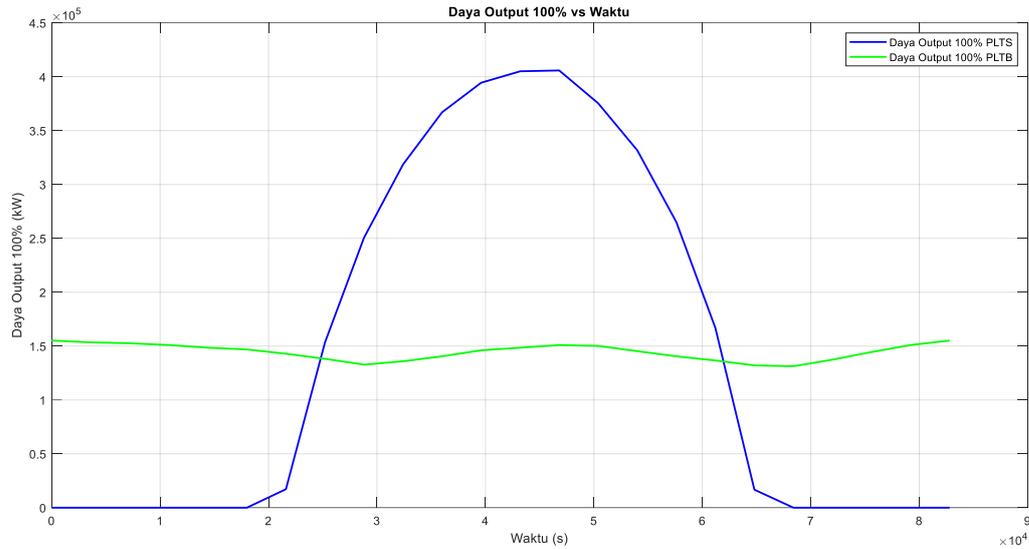
**Gambar 4.2** Beban Listrik Utilitas P. Bawean dalam Waktu 24 Jam

Untuk beban utilitas yang dibutuhkan masyarakat, masih sama nilainya seperti yang dijelaskan pada pendahuluan. Namun beban tersebut akan ditambah kebutuhan listrik elektroliser pada siang hari, dan energi yang dihasilkan *fuel cell* pada malam hari. Hal ini menyebabkan adanya perubahan beban listrik menjadi gambar 4.2. Dapat dilihat ada sedikit kenaikan nilai beban sebesar 1,36 kW pada pukul 8 a.m sampai 6 p.m. dan terjadi penurunan beban pada jam 7 p.m. sampai jam 11 p.m. sebesar 1

### 4.2 Daya dan Kapasitas Pembangkit EBT

Pada penelitian ini, variabel yang digunakan adalah perbandingan kapasitas pembangkitan antara PLTS dan PLTB. Perhitungan awal adalah mencari kapasitas 100% PLTS, dimana PLTS ini harus mampu menghasilkan daya yang dibutuhkan P. Bawean selama 24 jam. Kemudian mencari kapasitas 100% PLTB, dimana jika hanya menggunakan PLTB saja, pembangkit ini harus mampu memenuhi kebutuhan daya P. Bawean dalam 24 jam.

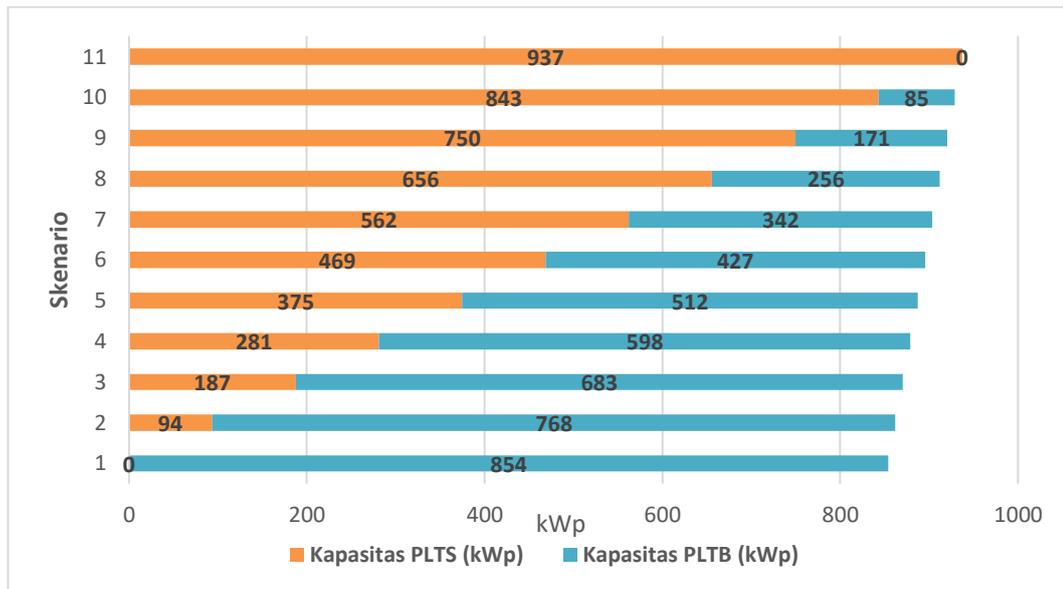
Setelah mendapatkan nilai kapasitas 100% PLTS dan 100% PLTB, maka akan dicari kapasitas terpasang dari PLTS dan PLTB tersebut pada setiap skenario yang akan dijalankan.



**Gambar 4.3** Output Daya yang Dihasilkan 100% PLTS dan 100% PLTB

#### 4.2.1 Kapasitas Pembangkit PLTS dan PLTB

Dapat dilihat pada gambar 4.4, bahwa dari skenario 1 sampai skenario 11, PLTS memiliki nilai kapasitas terpasang yang semakin besar. Demikian sebaliknya untuk PLTB, kapasitas terpasang PLTB akan semakin kecil pada skenario 11 dari pada skenario 1. Dari gambar 4.4 dapat diketahui pula, bahwa nilai kapasitas terpasang 100% PLTS dan 100% PLTB tidak memiliki nilai yang sama, hal ini disebabkan karena sifat dari PLTS yang hanya dapat menghasilkan daya pada siang hari saja, dan untuk kebutuhan daya malam hari PLTS harus menghasilkan daya yang besar pada siang hari kemudian disimpan pada baterai, kemudian baterai akan menjadi pembangkit cadangan pada malam hari. Hal ini berbeda dengan PLTB yang memiliki kecenderungan dapat menghasilkan daya selama 24 jam, sehingga kapasitas terpasang PLTB akan semakin kecil.



**Gambar 4.4** Kapasitas PLTS dan PLTB pada setiap Skenario

#### 4.2.2 Daya Genset

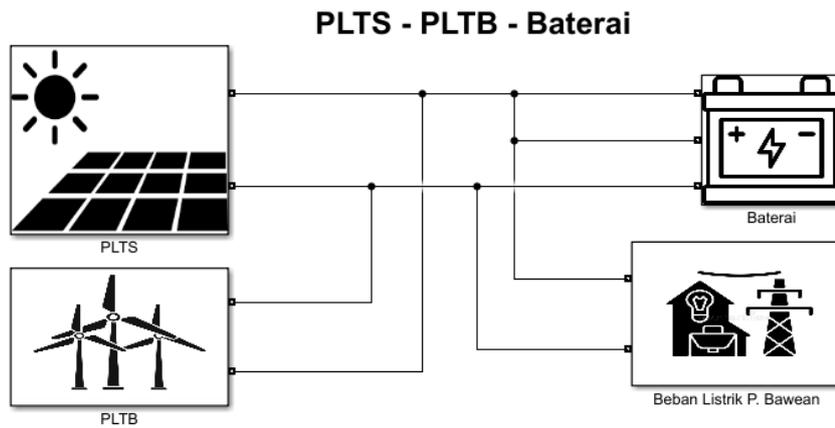
Untuk saat ini menggunakan genset *existing* yang sudah ada di P. Bawean merupakan pilihan terbaik. Sebelumnya P. Bawean memiliki PLTD dengan kapasitas unit terpasang 350 kW. Namun memiliki efisiensi daya mampu 58%, sehingga daya keluaran dari PLTD sebesar 203 kW.

#### 4.3 Simulasi Kebutuhan Daya P. Bawean

Dari data PLTS, PLTB, beban listrik P. Bawean dan elektroliser, maka data ini dapat digunakan untuk mencari kebutuhan baterai yang harus terpasang pada setiap skenario yang telah direncanakan.

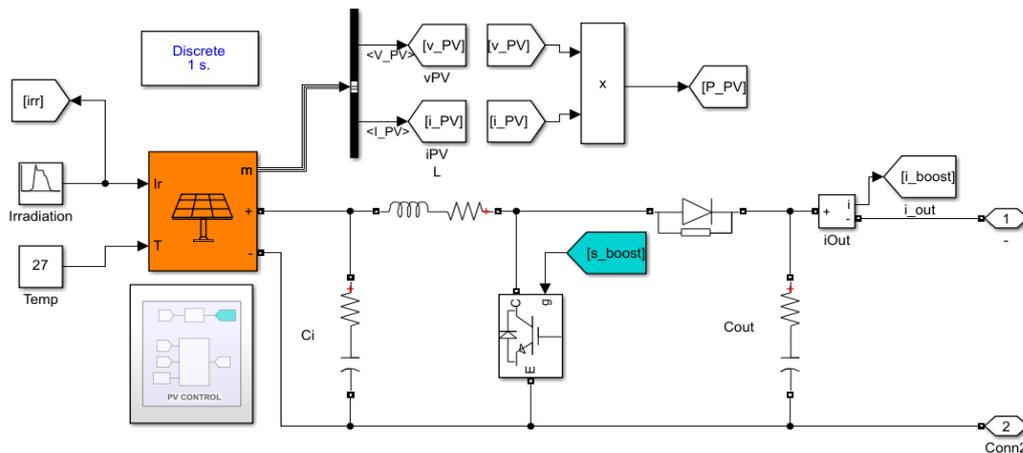
##### 4.3.1 Penyusunan Rangkaian Simulink pada Matlab

Pada penyusunan rangkaian Simulink di *software* Matlab, menggunakan rangkaian beberapa system yang digunakan, dengan tujuan agar simulasi ini berjalan seperti pada kondisi nyata.



Gambar 4.5 Rangkaian Simulink pada Matlab

#### 4.3.1.1 Rangkaian Simulink PLTS

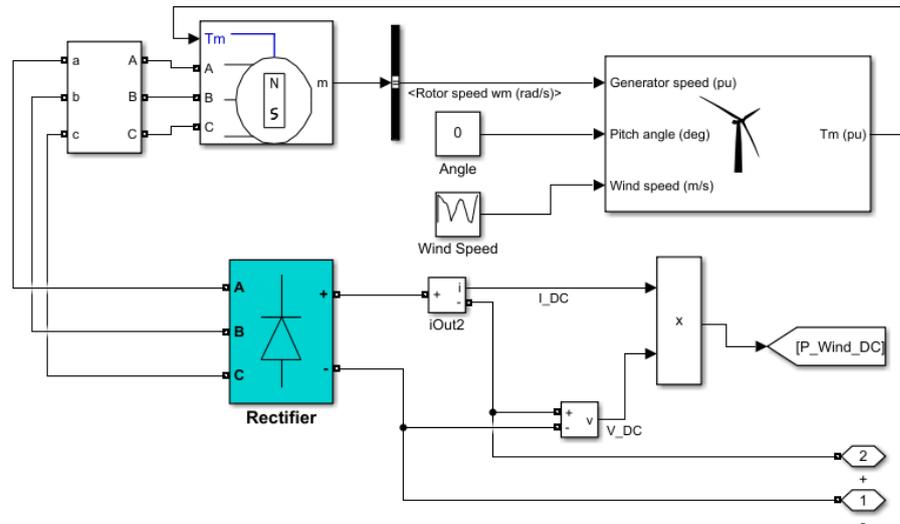


Gambar 4.6 Rangkaian Simulink PLTS

Rangkaian lebih detail untuk PLTS dari system EBT yang ada pada gambar 4.5, dapat dijabarkan pada gambar 4.6.

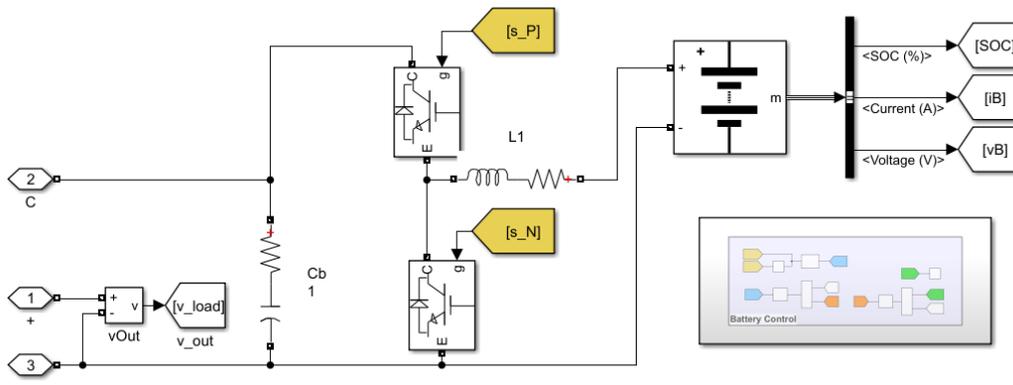
#### 4.3.1.2 Rangkaian Simulink PLTB

Pada rangkaian PLTB, tegangan yang dihasilkan adalah AC. Maka dari itu dibutuhkan inverter untuk mengubah AC ke DC.



**Gambar 4.7** Rangkaian Simulink PLTB

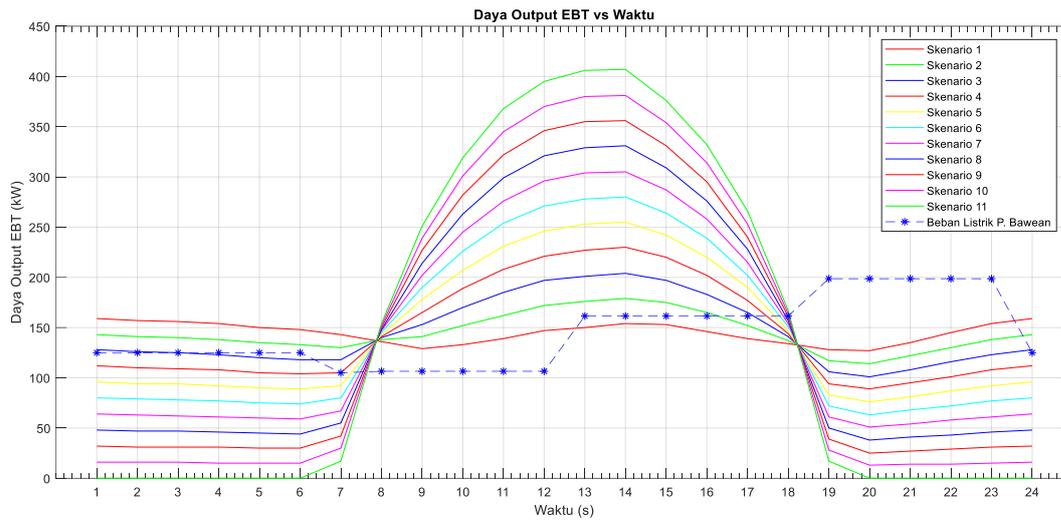
### 4.3.1.3 Baterai



**Gambar 4.8** Rangkaian Simulink Baterai

### 4.4 Profil Daya dan Beban Simulasi

Dari 11 skenario yang menjadi variable dalam penelitian ini, mendapatkan 11 perbedaan kapasitas pembangkitan pada masing-masing PLTS maupun PLTB. Gambar 4.9 menunjukkan daya output yang dihasilkan oleh PLTS dan PLTB pada tiap skenario yang berjalan.

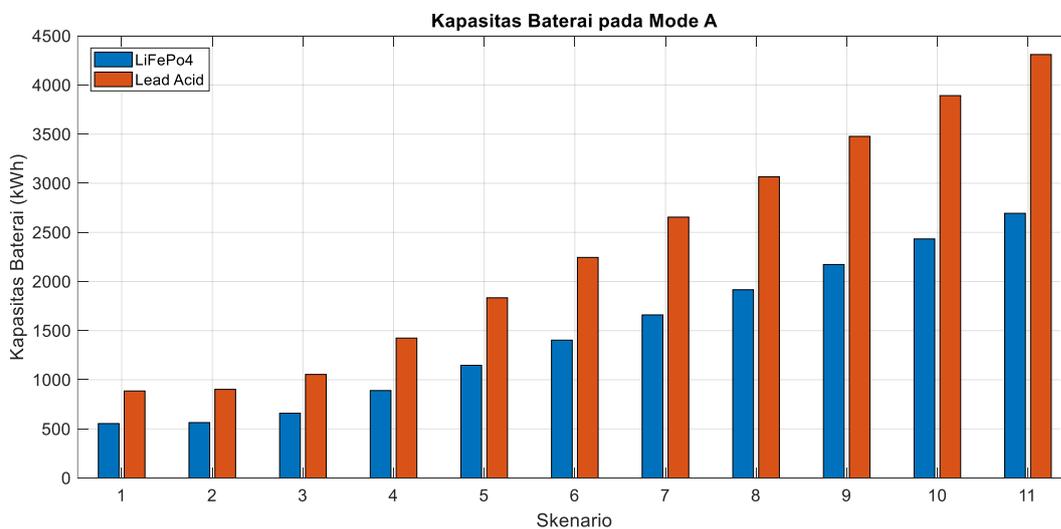


**Gambar 4.9** Daya Output EBT (PLTS+PLTB) pada tiap Skenario

#### 4.5 Hasil Simulasi Mode A

Kondisi sistem pada mode A adalah sistem seluruhnya menggunakan EBT, yaitu PLTS, PLTB dan Baterai. Dan simulasi dijalankan pada tiap skenario perbandingan PLTS dan PLTB.

##### 4.5.1 Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode A



**Gambar 4.10** Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode A

Kapasitas baterai yang dibutuhkan pada tiap skenario berbeda. Pada skenario pertama, membutuhkan kapasitas baterai yang lebih kecil dari pada skenario selanjutnya. Hal ini disebabkan semakin besar jumlah PLTB yang digunakan, maka semakin kecil kapasitas baterai yang dibutuhkan seperti yang

ditunjukkan pada gambar 4.10. Jumlah kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk memenuhi beban listrik yang sama, baterai Lead Acid membutuhkan kapasitas yang lebih besar. Hal ini disebabkan karakter *Depth of Discharge* baterai Lead Acid lebih kecil daripada baterai LiFePo<sub>4</sub>.

#### **4.5.2 Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode A**

Karena pada mode A seluruhnya menggunakan energi baru dan terbarukan, maka mode A tidak membutuhkan bahan bakar.

#### **4.5.3 Produksi Emisi CO<sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode A**

Pada mode A tidak ada sistem yang menghasilkan pencemaran CO<sub>2</sub>. Maka dari itu tidak terdapat emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan pada mode A.

### **4.6 Hasil Simulasi Mode B**

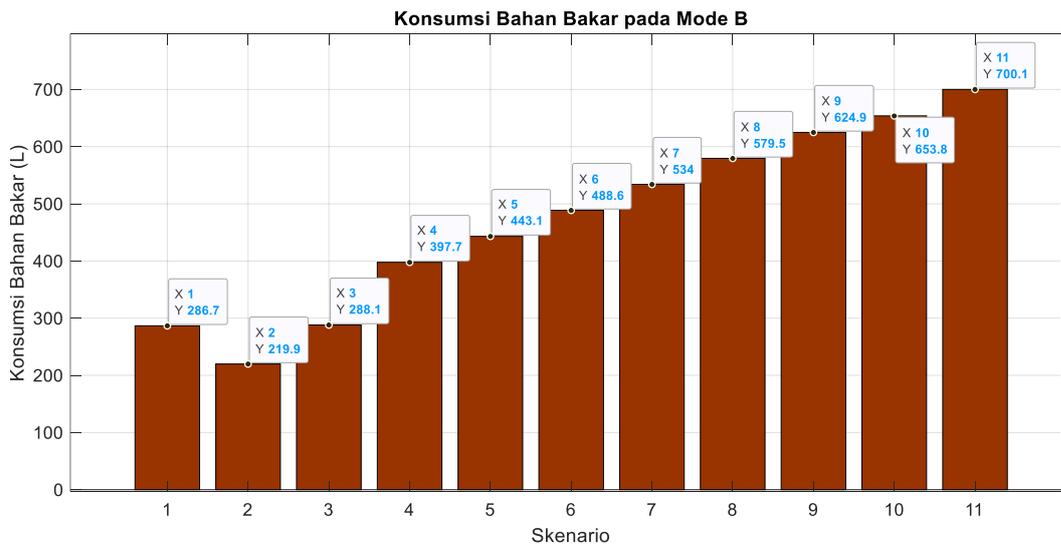
Perbedaan mode A dan mode B adalah pada penyimpanan energinya. Pada mode A, penyimpanan energi menggunakan baterai. Sedangkapan pada mode B, baterai diganti oleh PLTD.

#### **4.6.1 Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode B**

Karena pada mode B tidak menggunakan baterai sebagai penyimpanan energi. Maka kapasitas baterai yang dibutuhkan pada mode B adalah 0.

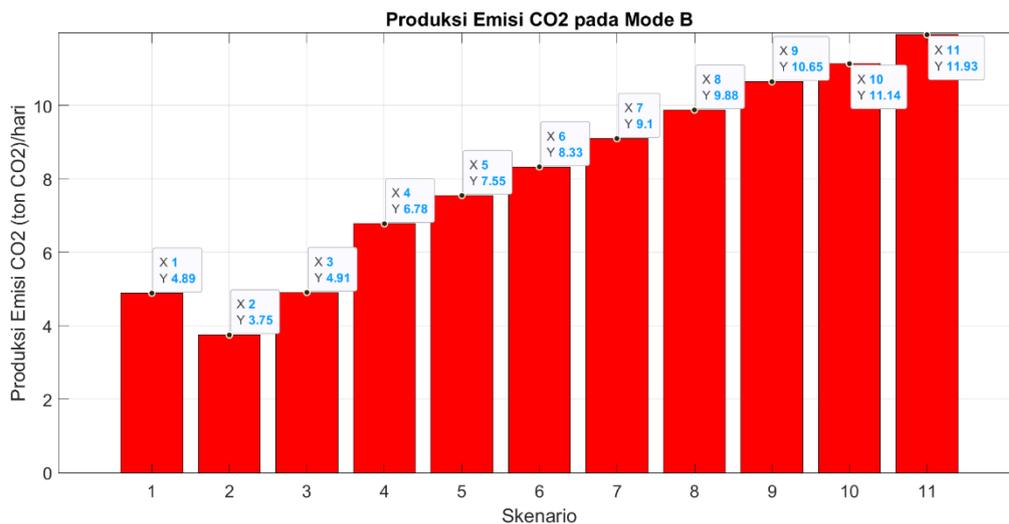
#### **4.6.2 Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode B**

Pada gambar 4.11 menunjukkan konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan tiap skenario pada mode B. Dapat dilihat pada gambar 4.11 bahwa konsumsi bahan bakar skenario 2 sebesar 219,9 L/hari lebih kecil daripada skenario 1 yang konsumsi bahan bakarnya 286,7 L/hari. Hal ini disebabkan oleh PLTS yang terpasang, pada skenario 1, tidak ada PLTS yang terpasang, namun pada skenario 2, kerja PLTB pada siang hari dibantu oleh PLTS.



**Gambar 4.11** Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode B

#### 4.6.3 Produksi Emisi CO<sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode B



**Gambar 4.12** Produksi Emisi CO<sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode B

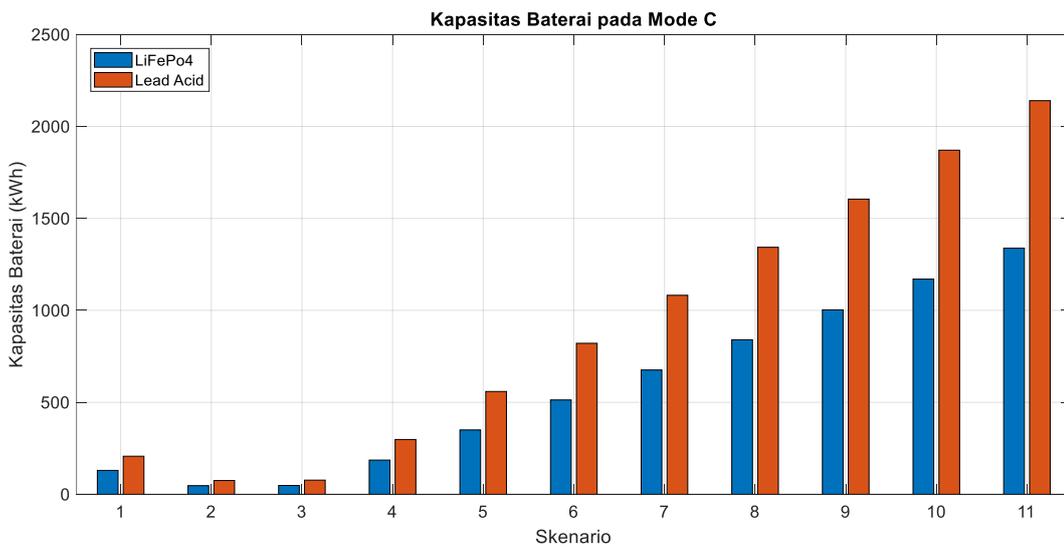
Produksi emisi CO<sub>2</sub> berbanding lurus dengan konsumsi bahan bakar yang terjadi pada PLTD. Ketika PLTD semakin besar konsumsi bahan bakarnya karena butuh untuk menghasilkan daya listrik, maka semakin besar pula emisi yang dihasilkan. Terlihat pada gambar 4.11 dan 4.12 memiliki bentuk grafik yang serupa. Nilai emisi terendah terjadi pada skenario 2 yaitu 3,75 tonCO<sub>2</sub>/hari, nilai emisi tertinggi pada skenario 11 yaitu 11,93 tonCO<sub>2</sub>/hari, hal ini karena konsumsi bahan bakar pada skenario 2 juga rendah dari pada skenario yang lainnya.

## 4.7 Hasil Simulasi Mode C

Pada mode C, sistem EBT yang dipasang akan dibantu oleh PLTD selama beban puncak terjadi. Hal ini diharapkan untuk dapat mengurangi jumlah baterai yang dibutuhkan dan menurunkan nilai investasi yang ada.

### 4.7.1 Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode C

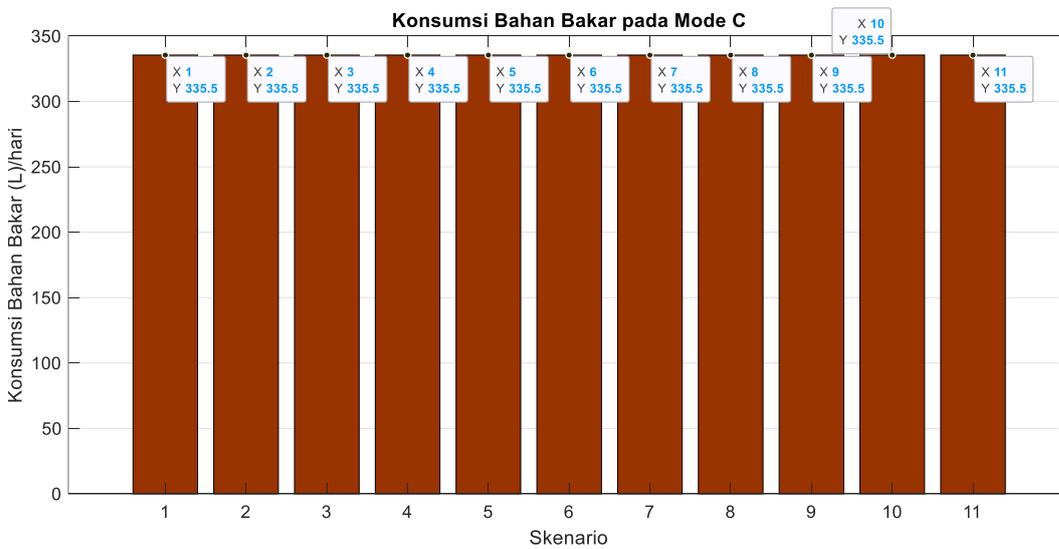
Kapasitas baterai yang dibutuhkan pada tiap skenario berbeda. Pada skenario 2, membutuhkan kapasitas baterai yang paling kecil dari seluruh skenario yaitu 47 kWh untuk LiFePo<sub>4</sub> dan 75 kWh untuk Lead Acid untuk memenuhi kebutuhan listrik selama 24 jam. Pada skenario 2 menjadi titik terkecil kebutuhan kapasitas baterai dari pada skenario yang lain, hal ini berbeda dengan mode A dimana titik terendahnya terjadi pada skenario 1. Fenomena ini terjadi karena adanya bantuan PLTD yang dihidupkan ketika beban puncak terjadi pada malam hari.



**Gambar 4.13** Kapasitas Baterai pada tiap Skenario Mode C

#### 4.7.2 Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode C

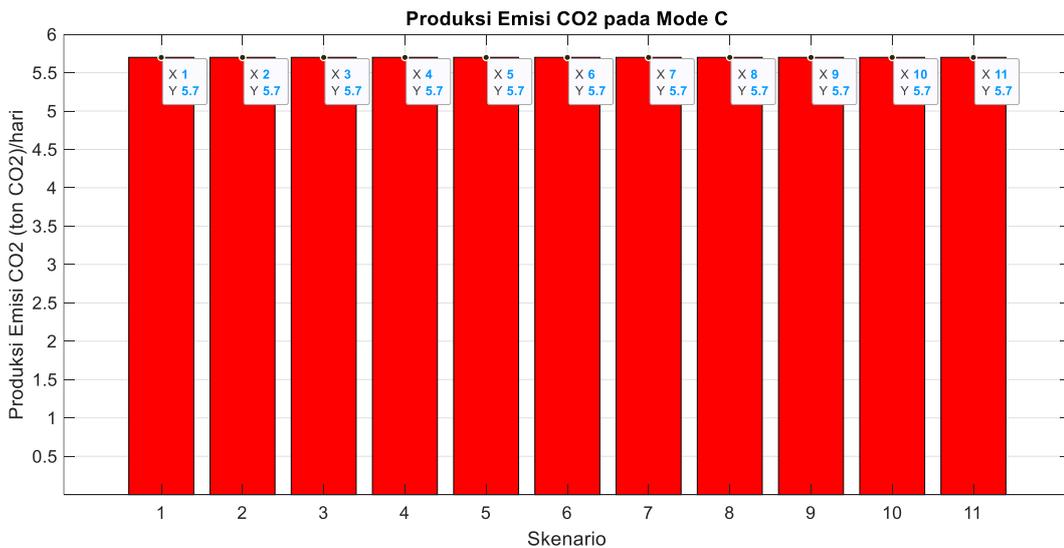
Pada gambar 4.14 menunjukkan tingkat konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan tiap skenario pada mode C. Dapat dilihat pada gambar 4.14 bahwa konsumsi bahan bakar tetap pada nilai 335,5 L/hari pada tiap skenario yang dianalisa. Hal ini dikarenakan PLTD hanya menyala selama beban puncak saja dari jam 7 p.m. sampai jam 11 p.m. tiap harinya, dan beban puncak pada tiap skenario memiliki nilai dan waktu yang sama.



**Gambar 4.14** Konsumsi Bahan Bakar pada tiap Skenario Mode C

#### 4.7.3 Produksi Emisi CO<sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode C

Pola produksi emisi CO<sub>2</sub> sama seperti konsumsi bahan bakar, yaitu sama pada mode C untuk seluruh skenarionya. Pada gambar 4.15 menunjukkan jika menggunakan mode C, maka pada setiap hari pembangkit P. Bawean menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 5,7 tonCO<sub>2</sub>.



**Gambar 4.15** Produksi Emisi CO<sub>2</sub> pada tiap Skenario Mode C

#### 4.8 Analisa Biaya Investasi dan *Break Event Point*

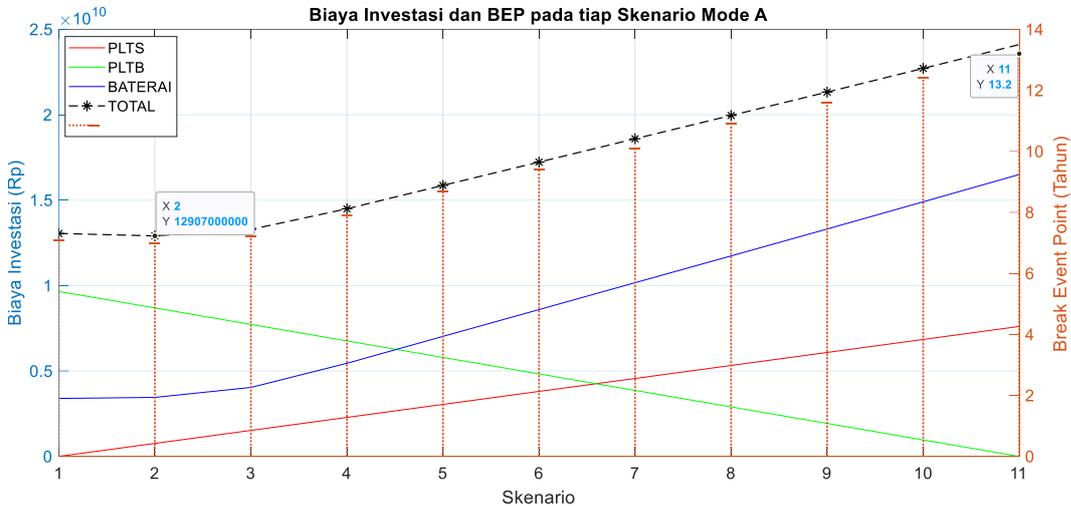
Untuk menentukan optimasi dalam penelitian ini, menggunakan analisa biaya untuk setiap mode dan skenario EBT yang direncanakan. Dan BEP dari nilai investasi akan digunakan sebagai ukuran untuk menghitung optimasi keuntungan dari penelitian ini.

##### 4.8.1 Analisa Biaya Investasi dan *Break Event Point* untuk Mode A

Pada gambar 4.16 dapat dilihat biaya yang dibutuhkan untuk investasi pada tiap skenario pada mode A. Nilai investasi didapatkan dari kapasitas yang dibutuhkan oleh PLTS, PLTB dan Baterai untuk memenuhi kebutuhan beban daya P. Bawean. Analisa biaya investasi ini dihitung untuk memenuhi beban P. Bawean selama 24 jam.

Pada gambar 4.16 grafik berwarna merah menunjukkan biaya yang dibutuhkan oleh PLTS, grafik warna hijau menunjukkan biaya investasi yang dibutuhkan oleh PLTB, grafik warna biru menunjukkan biaya yang dibutuhkan untuk investasi baterai, serta grafik warna hitam dengan garis putus-putus merupakan representasi dari total investasi yang dibutuhkan. Dari grafik warna hitam dapat diketahui, bahwa biaya investasi terendah untuk mode A jika menggunakan sistem kelistrikan dengan skenario 2, dengan nilai investasi sebesar Rp 12.907.029.560,60/pembangkit. Sedangkan grafik warna coklat menunjukkan

BEP yang dibutuhkan pada tiap skenario yang di analisa, dan BEP tertinggi terjadi pada skenario 11 dengan waktu 13,2 tahun/pembangkit.

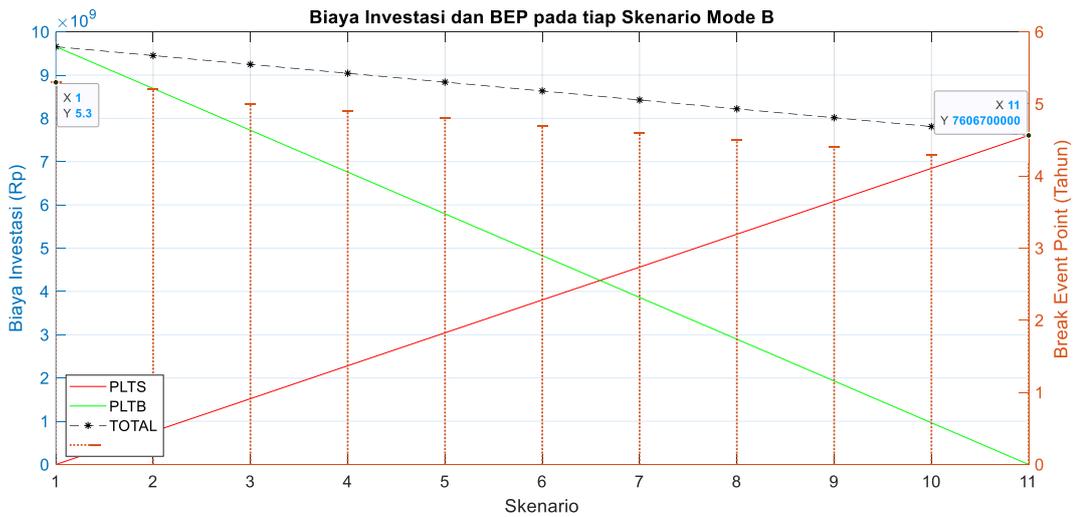


**Gambar 4.16** Nilai Investasi dan BEP pada tiap Skenario Mode A

#### 4.8.2 Analisa Biaya Investasi dan *Break Event Point* untuk Mode B

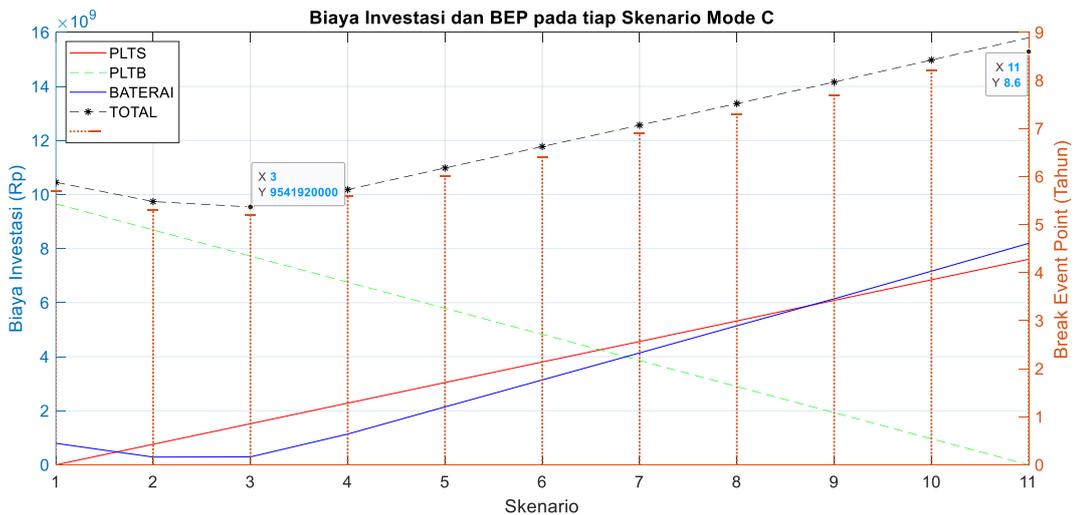
Pada gambar 4.17 dapat dilihat biaya yang dibutuhkan untuk investasi pada tiap skenario pada mode B. Nilai investasi didapatkan dari kapasitas yang dibutuhkan oleh PLTS dan PLTB untuk memenuhi kebutuhan beban daya P. Bawean. Analisa biaya investasi ini dihitung untuk memenuhi beban P. Bawean selama 24 jam.

Pada gambar 4.17 grafik berwarna merah menunjukkan biaya yang dibutuhkan oleh PLTS, grafik warna hijau menunjukkan biaya investasi yang dibutuhkan oleh PLTB, dan grafik warna hitam dengan garis putus-putus merupakan representasi dari total investasi yang dibutuhkan. Dari grafik warna hitam dapat diketahui, bahwa biaya investasi terendah untuk mode B jika menggunakan sistem kelistrikan dengan skenario 11, yaitu 100% PLTS tanpa menggunakan PLTB, dengan nilai investasi sebesar Rp 7.606.700.000,00/pembangkit. Sedangkan grafik warna coklat menunjukkan BEP yang dibutuhkan pada tiap skenario yang di analisa, dan BEP tertinggi terjadi pada skenario 1 dengan waktu 5,3 tahun/pembangkit.



**Gambar 4.17** Nilai Investasi dan BEP pada tiap Skenario Mode B

### 4.8.3 Analisa Biaya Investasi dan *Break Event Point* untuk Mode C



**Gambar 4.18** Nilai Investasi pada tiap Skenario Mode C

Pada gambar 4.18 dapat dilihat biaya yang dibutuhkan untuk investasi pada tiap skenario pada mode C. Nilai investasi didapatkan dari kapasitas yang dibutuhkan oleh PLTS, PLTB dan Baterai untuk memenuhi kebutuhan beban daya P. Bawean. Analisa biaya investasi ini dihitung untuk memenuhi beban P. Bawean selama 24 jam. Grafik untuk investasi baterai menunjukkan nilai yang lebih rendah dari pada grafik investasi baterai pada mode A, hal ini disebabkan karena diesel dihidupkan pada beban puncak, sehingga tidak membutuhkan baterai sebesar mode A.

Pada gambar 4.18 grafik berwarna merah menunjukkan biaya yang dibutuhkan oleh PLTS, grafik warna hijau menunjukkan biaya investasi yang dibutuhkan oleh PLTB, grafik warna biru menunjukkan biaya yang dibutuhkan untuk investasi baterai, serta grafik warna hitam dengan garis putus-putus merupakan representasi dari total investasi yang dibutuhkan. Dari grafik warna hitam dapat diketahui, bahwa biaya investasi terendah untuk mode C jika menggunakan sistem pembangkit dengan skenario 3, dengan nilai investasi sebesar Rp 9.541.920.000/pembangkit. Sedangkan grafik warna coklat menunjukkan BEP yang dibutuhkan pada tiap skenario yang di analisa, dan BEP tertinggi terjadi pada skenario 11 dengan waktu 8,8 tahun/pembangkit.

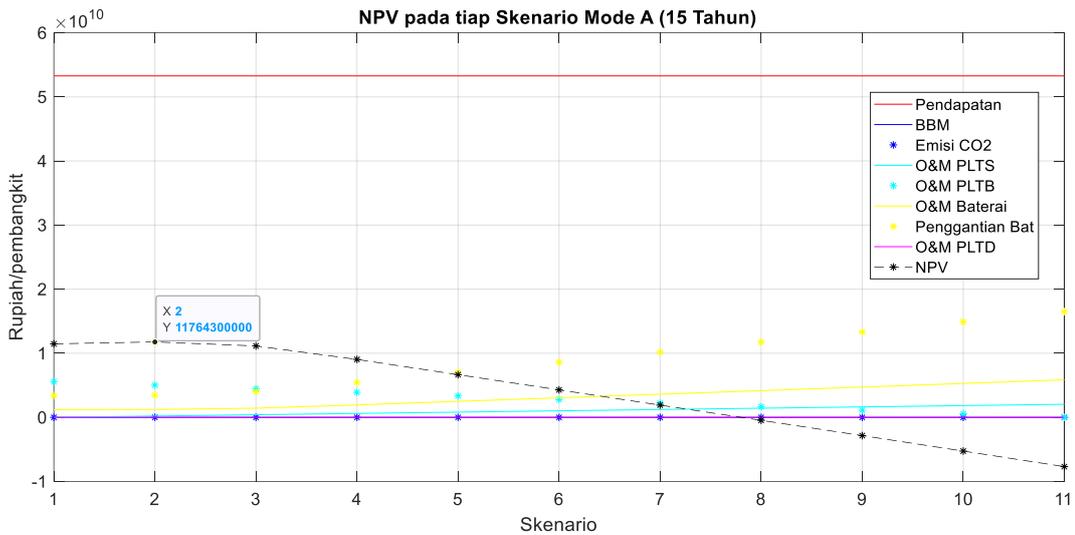
Dengan demikian, nilai investasi terendah untuk pembangkit P. Bawean dapat menggunakan Mode B pada skenario 11, dengan nilai investasi sebesar Rp 7.606.700.000,00/pembangkit.

#### **4.9 Analisa *Cash Flow* dalam Waktu 15 Tahun**

Setelah mengetahui biaya yang investasi yang dibutuhkan tiap mode dan skenario, maka didapatkan BEP yang berbeda pada tiap mode dan skenario, hal ini dikarenakan tiap mode dan skenario memiliki nilai investasi yang berbeda. Dari BEP yang telah dijelaskan pada bab 4.8, maka diketahui BEP terlama terjadi pada mode A dengan skenario 11, yaitu membutuhkan waktu 13,2 tahun untuk mencapai BEP investasi. Untuk mempermudah perhitungan, akan dianalisa *cash flow* pada tiap mode dan skenario dengan waktu 15 tahun (5475 hari).

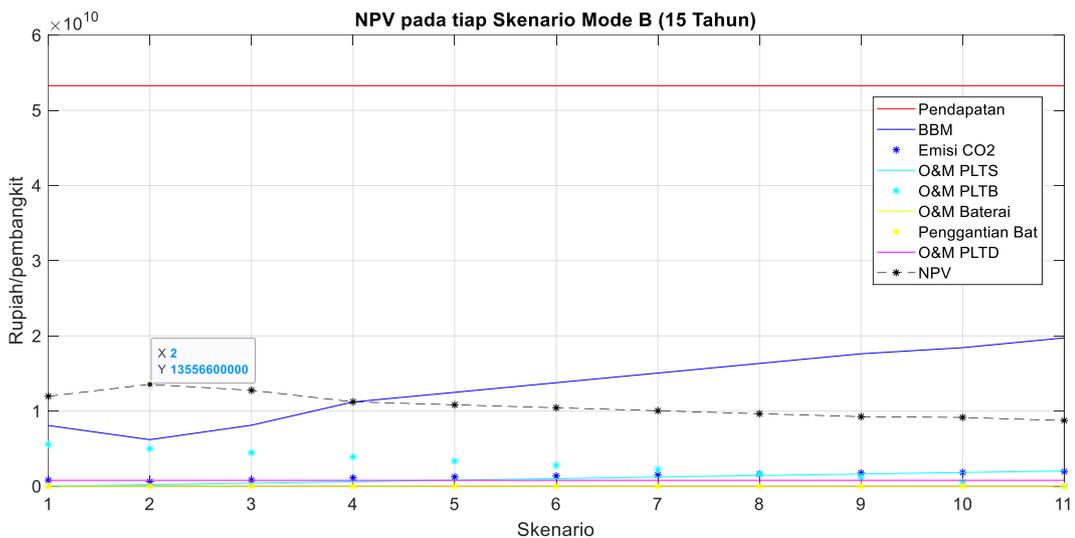
##### **4.9.1 Analisa NPV dalam Waktu 15 Tahun untuk Mode A**

Pada mode A, semua sistem pembangkit menggunakan energi baru dan terbarukan. Dimulai dari PLTS, PLTB serta Baterai untuk pembangkit cadangan. Pada gambar 4.19 dari seluruh skenario yang dijalankan dalam waktu 15 tahun, NPV tertinggi dapat ditemukan pada skenario 2, dengan nilai Rp 11.764.165.155,00 (11,7 Milyar).



**Gambar 4.19** NPV pada tiap Skenario Mode A

#### 4.9.2 Analisa NPV dalam Waktu 15 Tahun untuk Mode B

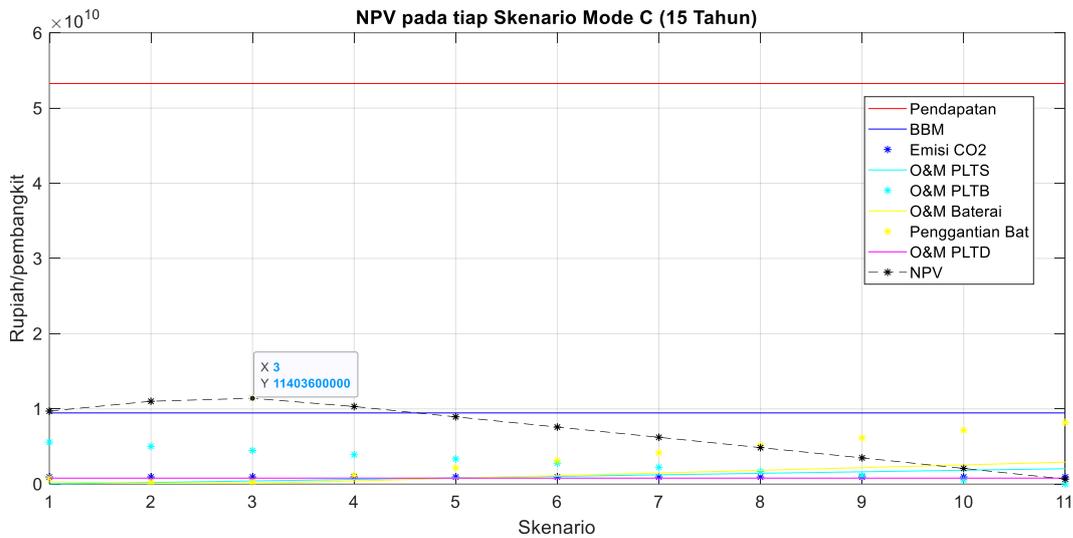


**Gambar 4.20** NPV pada tiap Skenario Mode B

Pada mode B, sistem pembangkit menggunakan energi baru dan terbarukan, yaitu PLTS dan PLTB. Namun untuk mensuplai kebutuhan daya yang tidak dapat dipenuhi oleh pembangkit, mode B menggunakan diesel (PLTD) sebagai cadangan pembangkit. Pada gambar 4.20 dari seluruh skenario yang dijalankan dalam waktu 15 tahun, NPV tertinggi dapat ditemukan pada skenario 2, dengan nilai Rp 13.556.606.858,00 (13,5 Milyar).

### 4.9.3 Analisa NPV dalam Waktu 15 Tahun untuk Mode C

Pada mode C, sistem pembangkit menggunakan energi baru dan terbarukan, yaitu PLTS dan PLTB serta baterai sebagai penyimpanan cadangan energi. Namun ketika beban puncak P. Bawean, energi disuplai dari PLTD sebesar 350 kWp. Pada gambar 4.21 dari seluruh skenario yang dijalankan dalam waktu 15 tahun, NPV tertinggi dapat ditemukan pada skenario 3, dengan nilai Rp 11.403.643.946,00 (11,4 Milyar).



**Gambar 4.21** NPV pada tiap Skenario Mode C

Dari hasil perhitungan NPV pada tiap mode dan skenario, dapat dipilih sebagai investasi yang akan menguntungkan dalam jangka waktu 15 tahun kedepan yaitu adalah mode B pada skenario 2 dengan nilai NPV sebesar Rp 13.556.606.858,00 (13,5 Milyar).

## BAB 5

### DISKUSI DAN PEMBAHASAN

#### 5.1 Emisi CO<sub>2</sub> Harian di Pulau Bawean

**Tabel 5.1** *Heatmap* Emisi CO<sub>2</sub>/hari pada tiap Mode dan Skenario

Emisi CO <sub>2</sub> (ton CO <sub>2</sub> /hari)						
Skenario	Mode A		Mode B		Mode C	
	Lead Acid	LiFePo4	Lead Acid	LiFePo4	Lead Acid	LiFePo4
1	0	0	5	5	6	6
2	0	0	4	4	6	6
3	0	0	5	5	6	6
4	0	0	7	7	6	6
5	0	0	8	8	6	6
6	0	0	8	8	6	6
7	0	0	9	9	6	6
8	0	0	10	10	6	6
9	0	0	11	11	6	6
10	0	0	11	11	6	6
11	0	0	12	12	6	6

Pada tabel 5.1 menunjukkan tingkat emisi CO<sub>2</sub> yang dapat dihasilkan oleh setiap konfigurasi mode dan skenario yang direncanakan. Semakin hijau warna dari *heatmap* tabel 5.1 menunjukkan semakin rendah emisi yang dihasilkan, warna ini ditunjukkan pada mode A karena pada mode A seluruh sistem menggunakan EBT. Dan tingkat emisi tertinggi terjadi pada mode B dengan skenario 11, karena penyimpanan energi diganti dengan PLTD.

Pulau Bawean memiliki diesel dengan kapasitas daya mampu sebesar 3280 kW [1]. Sebelum digunakan energi baru dan terbaharukan di Pulau Bawean, untuk suplai listrik harian menggunakan PLTD ini. Jika dihitung emisi karbon

harian yang dapat dihasilkan oleh sistem pembangkit PLTD ini mencapai 128,5 tonCO<sub>2</sub>e/hari. Hal ini menunjukkan PLTD Pulau Bawean berkontribusi dalam meningkatnya emisi CO<sub>2</sub>. Jika seluruh sistem pembangkit listrik Pulau Bawean dapat dirubah menjadi energi terbarukan seperti mode A, maka emisi sebesar 128,5 tonCO<sub>2</sub>e/hari dapat dihindari, hal ini dapat membantu menjaga kelestarian bumi untuk masa yang akan datang.

## 5.2 Kelayakan Keekonomian

**Tabel 5.2** Heatmap NPV pada tiap Mode dan Skenario

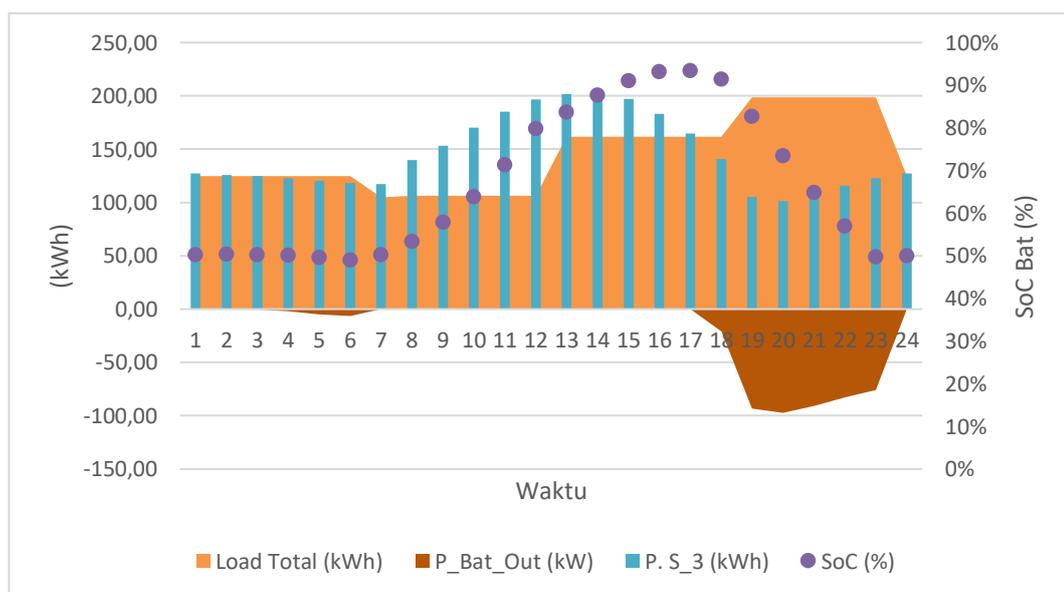
NPV (Milyar Rupiah)						
Skenario	Mode A		Mode B		Mode C	
	Lead Acid	LiFePo <sub>4</sub>	Lead Acid	LiFePo <sub>4</sub>	Lead Acid	LiFePo <sub>4</sub>
1	Rp 6,10	Rp 3,79	Rp 4,30	Rp 4,30	Rp 2,57	Rp 2,03
2	Rp 7,01	Rp 4,67	Rp 6,46	Rp 6,46	Rp 4,11	Rp 3,91
3	Rp 7,36	Rp 4,62	Rp 6,24	Rp 6,24	Rp 5,08	Rp 4,88
4	Rp 6,80	Rp 3,10	Rp 5,29	Rp 5,29	Rp 5,14	Rp 4,37
5	Rp 6,07	Rp 1,29	Rp 5,47	Rp 5,47	Rp 5,03	Rp 3,57
6	Rp 5,33	-Rp 0,50	Rp 5,65	Rp 5,65	Rp 4,92	Rp 2,79
7	Rp 4,60	-Rp 2,31	Rp 5,83	Rp 5,83	Rp 4,81	Rp 2,00
8	Rp 3,87	-Rp 4,10	Rp 6,02	Rp 6,02	Rp 4,71	Rp 1,21
9	Rp 3,14	-Rp 5,90	Rp 6,20	Rp 6,20	Rp 4,60	Rp 0,42
10	Rp 2,38	-Rp 7,74	Rp 6,67	Rp 6,67	Rp 4,47	-Rp 0,41
11	Rp 1,62	-Rp 9,59	Rp 6,84	Rp 6,84	Rp 4,33	-Rp 1,24

Berdasarkan tabel 5.2 nilai NPV terbesar jika menggunakan baterai *Lead Acid* terjadi pada mode A dengan skenario 3, dengan nilai Rp 7,36 Milyar. Dan jika menggunakan baterai LiFePo<sub>4</sub> terjadi pada mode B dengan skenario 11, dengan nilai Rp 6,84 Milyar. Jika dilihat dari nilai NPV yang terjadi dengan umur proyek 15 tahun, maka mode A dan skenario 11 dengan menggunakan baterai *Lead Acid* akan menjadi pilihan proyek paling menguntungkan.

Menggunakan penyimpanan energi baterai LiFePo<sub>4</sub> secara teknologi akan membawa keuntungan lebih tangguh dan bertahan dengan umur lebih panjang dalam hal pembangkitan. Namun untuk saat ini yang lebih available digunakan di Indonesia dengan karakter radiasi, kecepatan angin, geografis dan keekonomian adalah baterai Lead Acid. Dengan menggunakan baterai Lead Acid dengan mode A dan skenario 3, dalam waktu 15 tahun akan menghasilkan nilai NPV sebesar Rp 7,36 Milyar.

### 5.3 Simulasi Aliran Daya pada Mode A dengan Skenario 3

Beban total harian selama 24 jam yang ada di P. Bawean dapat dipenuhi oleh daya keluaran yang dihasilkan oleh PLTS dan PLTB. Ketika daya keluaran PLTS dan PLTB tidak dapat memenuhi beban saat itu, maka baterai sebagai penyimpanan energi dapat melepaskan energinya untuk memenuhi permintaan daya oleh P. Bawean. Gambar 5.1 menunjukkan grafik kebutuhan dan pemenuhan daya selama 24 jam untuk Mode A dengan skenario 3. Pada konfigurasi ini, sumber pembangkit utama berasal dari energi baru dan terbarukan, yaitu PLTS dan PLTB dengan perbandingan 20%-80% dan untuk cadangan energi menggunakan baterai *lead-acid* dengan kapasitas 1054 kWh. Ketika produksi daya oleh EBT tidak dapat memenuhi daya permintaan, baterai *lead-acid* akan *discharging* untuk memenuhi permintaan listrik di P. Bawean.



**Gambar 5.1** Simulasi Aliran Daya pada Mode A – Skenario 3



## BAB 6

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini, didapatkan kesimpulan:

- a. Energi yang dibutuhkan untuk produksi oksigen dengan volume 1250 L/hari adalah 16,43 kWh, dan menghasilkan volume hidrogen sebanyak 2500 L. Dari jumlah hidrogen yang dihasilkan, dengan efisiensi fuel cell 45% dapat dikonversi menjadi energi listrik sebesar 6,77 kWh.
- b. Pada mode A (pembangkit menggunakan PLTS dan PLTB serta suplai energi cadangan menggunakan baterai) membutuhkan kapasitas baterai LiFePo<sub>4</sub> terbesar adalah 2694 kWh pada skenario 11 (100% PLTS) dan kapasitas *lead-acid* sebesar 4310 kWh pada skenario 11 (100% PLTS). Untuk investasi terbesar dengan baterai LiFePo<sub>4</sub> terjadi pada skenario 11 (100% PLTS) sebesar Rp 26 Milyar, jika dengan baterai *lead-acid* terjadi pada skenario 1 (100% PLTD) sebesar Rp 18,9 Milyar. Namun untuk biaya operasional terendah dengan baterai LiFePo<sub>4</sub> didapatkan oleh skenario 2 (10% PLTS dan 90% PLTB) sebesar Rp 0,66 Milyar/tahun dan untuk baterai *lead-acid* didapatkan pada skenario 3 (20% PLTS dan 80% PLTB) sebesar Rp 0,61 Milyar/tahun. Kemudian dapat diketahui dari perhitungan bahwa mode A dapat menurunkan emisi menjadi 0 tonCO<sub>2</sub>e/hari, karena seluruh sistem menggunakan energi alternatif.
- c. Pada mode B (pembangkit menggunakan PLTS dan PLTB serta suplai energi cadangan menggunakan PLTD) tidak membutuhkan baterai. Untuk investasi terbesar terjadi pada skenario 1 (100% PLTB) dengan nilai Rp 17,3 Milyar. Dan untuk biaya operasional terendah LiFePo<sub>4</sub> dan *lead-acid* didapatkan oleh skenario 2 (10% PLTS dan 90% PLTB) sebesar Rp 0,81 Milyar/tahun. Kemudian dapat diketahui dari perhitungan bahwa pada skenario 2 (10% PLTS dan 90% PLTB) dapat

- menurunkan emisi menjadi 4 tonCO<sub>2</sub>e/hari.
- d. Pada mode C (pembangkit menggunakan PLTS dan PLTB serta menggunakan baterai dan PLTD, pada beban puncak baterai *off* dan PLTD *on*) membutuhkan kapasitas baterai LiFePo<sub>4</sub> terbesar adalah 1338 kWh pada skenario 11 (100% PLTS) dan kapasitas *lead-acid* sebesar 2140 kWh pada skenario 11 (100% PLTS). Untuk investasi terbesar dengan baterai LiFePo<sub>4</sub> terjadi pada skenario 1 (100% PLTB) sebesar Rp 18,1 Milyar/tahun, jika dengan baterai *lead-acid* terjadi pada skenario 1 (100% PLTD) sebesar Rp 17,7 Milyar/tahun. Namun untuk biaya operasional terendah dengan baterai LiFePo<sub>4</sub> didapatkan oleh skenario 3 (20% PLTS dan 80% PLTB) sebesar Rp 1,03 Milyar/tahun dan untuk baterai *lead-acid* didapatkan pada skenario 3 (20% PLTS dan 80% PLTB) sebesar Rp 4,65 Milyar/tahun. Kemudian dapat diketahui dari perhitungan bahwa mode C dapat menurunkan emisi menjadi 6 tonCO<sub>2</sub>e/hari, karena penggunaan PLTD konstan di setiap skenario.
  - e. Dengan demikian pilihan terbaik untuk Pulau Bawean adalah mode A - skenario 3 dengan menggunakan penyimpanan energi baterai *lead-acid* dengan biaya operasional Rp 0,61 Milyar/tahun dengan nilai NPV sebesar Rp 7,36 Milyar.
  - f. Jika dilakukan pengecekan menggunakan *software Simulink 2022a*, maka dapat diketahui bahwa setiap sistem yang dianalisa dapat memenuhi permintaan energi P. Bawean selama 24 jam.

## 6.2 Saran

- a. Perlu adanya analisa lebih lanjut mengenai kebutuhan kapasitas PLTS, PLTB dan Baterai. Karena pada penelitian ini hanya terbatas pada waktu 24 jam. Maka perlu adanya pengembangan waktu analisa.
- b. Pentingnya analisa lebih detail untuk pengaruh setiap tonCO<sub>2</sub>e yang dilepaskan ke lingkungan sekitar terhadap perubahan temperatur global.
- c. Perhitungan lebih rinci pada analisa *cashflow* akan menghasilkan perhitungan yang lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, (2021), “*Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) 2021-2030*”, Jakarta, Indonesia
- [2] Watson D. dan Rodgers M. (2019), “Utility-scale storage providing peak power to displace on-island diesel generation”, *Journal of Energy Storage*, Vol. 22, hal. 80-87
- [3] Asian Development Bank, (2018), “*Handbook Battery Energy Storage System*”, Mandaluyong City, 1550 Metro Manila, Philippines, ISBN 978-92-9261-470-6 (print), 978-92-9261-471-3 (electronic), DOI: <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>
- [4] Gumintang, M.A., Sofyan, M.F. dan Sulaeman, I., (2020), “*Design and Control of PV Hybrid System in Practice*”, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, atas nama Kementerian Federal Jerman untuk Kerja sama Ekonomi dan Pembangunan, Jakarta, Indonesia
- [5] An, L.N., dan Tuan, T.Q., Dynamic Programming for Optimal Energy Management of Hybrid Wind–PV–Diesel–Battery. *Energies* 2018, *11*, 3039; doi:10.3390/en11113039
- [6] Koonten, G.C., Withey, P. dan Duan, J., (2020), “How big a battery?”, *Renewable Energy*, Vol. 146, hal. 196-204
- [7] Hernandez, D.D. dan Gencer, E., (2021), “Techno-economic analysis of balancing California’s power system on a seasonal basis: Hydrogen vs. lithium-ion batteries”, *Applied Energy*, Vol. 300, hal. 117-314
- [8] Karina, A.W., (2014), “*FEASIBILITY STUDY OF WAVE POWER PLANT (PLTGL) IN BAWEAN ISLAND GRESIK*”, Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
- [9] E. Skoplaki, JA Palyvos, “On The temperature dependence of module electrical performance: A review of efficiency/power correlation”, Science Direct, *Solar Energy*, 2009

- [10] Hariyadi, A., (2019), “*Operation Modelling of Proton Exchange Membrane Electrolyzer with Metal Hydride Storage*”, Faculty of Engineering and Science, University of Adger, Norwegia
- [11] Boujdaini, L.E., Mezrhab, A., Moussaoui, M.A., Jurabo, F., Vera, D., (2022), “Sizing of a stand-alone PV-wind-battery-diesel hybrid energy system and optimal combination using a particle swarm optimization algorithm”, *Electrical Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01529-0>
- [12] Oguz, E., and Senturk, A.E., (2019), “Selection of the Most Sustainable Renewable Energy System for Bozcaada Island: Wind vs. Photovoltaic”, *MDPI-Sustainability*, Vol. 11, 4098, doi:10.3390/su11154098
- [13] Pellow, M, A., Emmot, C.J.M., Barnhart, C.J., Benson, S.M., (2015), “Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis”, *Energy Environ. Sci.*, 2015, 8, 1938 DOI: 10.1039/c4ee04041d
- [14] Zappa, W., and Broek, M.v.d., “Analysing the potential of integrating wind and solar power in Europe using spatial optimisation under various scenarios”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 94, 1192-1216 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.071>
- [15] World Health Organization, (2020), “*Sumber penyediaan dan pendistribusian Oksigen untuk fasilitas perawatan COVID-19*”, WHO-UNICEF
- [16] Du, C.-Q.; Shao, J.-B.; Wu, D.-M.; Ren, Z.; Wu, Z.-Y.; Ren, W.-Q. “Research on Co-Estimation Algorithm of SOC and SOH for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles”. *Electronics* 2022, 11, 181. <https://doi.org/10.3390/electronics11020181>
- [17] Direktorat Jendral Ketenagalistrikan Kementrian ESDM Republik Indonesia, (2018), “*Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (Bidang Energi – Sub Bidang Ketenagalistrikan)*”, Jakarta, Indonesia
- [18] Brinsmead, T.S., Graham, P., Hayward, J., Ratnam, E.L., and Reedman, L. (2015). “*Future Energy Storage Trends: An Assessment of the Economic*

*Viability, Potential Uptake and Impacts of Electrical Energy Storage on the NEM 2015–2035*". CSIRO, Australia. Report No. EP155039

- [19] Nugroho, Y.A., (2016), "*Techno-Economic Analysis of Solar Photovoltaic Power Plant at PT. Pertamina (Persero) Refinery Unit IV Cilacap*", Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
- [20] Binelli, C. Estimating Causal Effects When the Treatment Affects All Subjects Simultaneously: An Application. *Big Data Cogn. Comput.* **2021**, 5, 22. <https://doi.org/10.3390/bdcc5020022>
- [21] Ali, K, A., Ahmad, M, I., Yusup, Y., Issues, Impacts, and Mitigation of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector. *Sustainability*, **2020**, 12, 7427. doi:10.3390/su12187427