

**TUGAS AKHIR**  
**STUDI PERBANDINGAN DAMPAK LINGKUNGAN DAN**  
**EKONOMI BERBAGAI JENIS PEMBANGKIT LISTRIK DI**  
**PULAU JAWA**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan**  
**Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan**



**Muhammad Rafli Kumala**

**18513069**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN**  
**FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN**  
**UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**  
**YOGYAKARTA**

**2024**

**TUGAS AKHIR**  
**STUDI PERBANDINGAN DAMPAK LINGKUNGAN DAN**  
**EKONOMI BERBAGAI JENIS PEMBANGKIT LISTRIK DI**  
**PULAU JAWA**

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan  
Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan



**Muhammad Rafli Kumala**  
**18513069**

Disetujui, Dosen Pembimbing :

**Fina Binazir Maziya, S.T., M.T.**

**NIK. 165131305**

Tanggal : 17 Desember 2024

Mengetahui,  
Ketua Prodi Teknik Lingkungan FTSP UII



**Any Juliani, S.T., M.Sc., (Res.Eng)., Ph.D**

**NIK. 045130401**

Tanggal : 18/12 2024

Activi

**HALAMAN PENGESAHAN**  
**STUDI PERBANDINGAN DAMPAK LINGKUNGAN DAN**  
**EKONOMI BERBAGAI JENIS PEMBANGKIT LISTRIK DI**  
**PULAU JAWA**

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari : Rabu

Tanggal : 18 Desember 2024

Disusun Oleh :

**Muhammad Rafli Kumala**

**18513069**

Tim Penguji :

**Fina Binazir Maziya, S.T., M.T.**

**Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D**

**Noviani Ima Wantoputri, S.T., M.T**

()

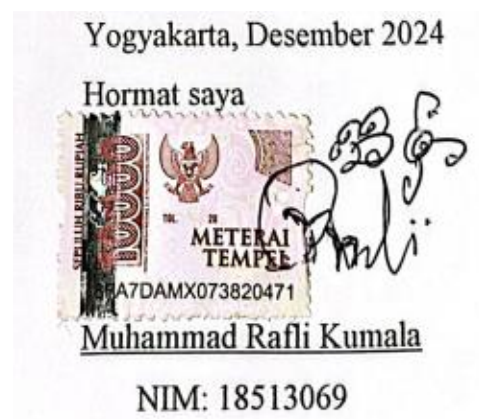
()

()

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.



## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum wr wb,

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Studi Perbandingan Dampak Lingkungan dan Ekonomi Berbagai Jenis Pembangkit Listrik di Pulau Jawa" ini dengan baik. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada junjungan kita, Nabi Muhammad SAW, yang telah membawa umat manusia ke jalan yang penuh dengan ilmu dan kebenaran.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Teknik Lingkungan di Universitas Islam Indonesia. Penulis menyadari bahwa proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga tercinta, Papa Rizal Kumala, Mama Susilawati, Kakak Chalsi Mala Sari, S.T., M.T., dan Adik Annisa Tri Kumala Ramadhani, yang telah memberikan dukungan moril, material, dan doa yang tidak pernah putus selama penulis menyelesaikan skripsi ini.
2. Ibu Fina Binazir Marzita, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, yang dengan sabar dan penuh perhatian memberikan bimbingan, arahan, serta masukan berharga selama proses penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.E.S., Ph.D. dan Ibu Noviani Ima Wantoputri, S.T., M.T., selaku dosen penguji, atas arahan, masukan, dan koreksi yang sangat berarti demi penyempurnaan karya ini.

4. Seluruh tenaga pengajar dan staf Teknik Lingkungan UII dan Fakultas Teknik Sipil Perencanaan UII, yang telah memberikan ilmu, wawasan, serta dukungan selama masa studi penulis.
5. Teman teman yang masih ada di Yogya. Eko Febriyanto, S. Hub. Int., Tri Wahyuningtyas, Ihsan Fauzi Shadiqi,, Siti Munawaroh,S. T, Siti Wawaliyah, S. T, dan Nurhanan yang masih menemani penulis dalam kondisi *Extra time* ini
6. Teman teman seperjuangan yang sudah terbang terlebih dahulu Vito Sastra Bintang, S. T, Rexa Nakula, S. T, dan Satya Bilawa Haryadi S. T, yang menemani masa perkuliahan dan saling memberikan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Kepada Lisna Azkia Salsabila, S. M, yang senantiasa memberi semangat setiap waktu, selalu siap mendengarkan segala keluh kesah peneliti, serta memberikan masukan dan saran yang sangat amat baik dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
8. Seluruh keluarga, teman, dan pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Peneliti berharap semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi penulis dan pembaca.
9. *Last but not least, I wanna thank me. I wanna thank me for believing in me, for putting in all the hard work, for never giving up, and for always staying true to myself. I wanna thank me for being my own biggest supporter through the ups and downs. Because without me, none of this would've been possible*

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat diharapkan. Wassalamualaikum Wr.Wb.

Yogyakarta, Desember 2024

*Yours Truly,*

Muhammad Rafli Kumala

MUHAMMAD RAFLI KUMALA. Studi Perbandingan Dampak Lingkungan dan Ekonomi Berbagai Jenis Pembangkit Listrik di Pulau Jawa. Dibimbing oleh FINA BINAZIR MAZIYA, S.T., M.T

### **ABSTRAK**

Perubahan iklim akibat emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang tinggi, terutama dari pembangkit listrik tenaga batu bara, memicu peningkatan suhu global, cuaca ekstrem, dan kerusakan ekosistem. Dengan tingginya ketergantungan pada batu bara di Pulau Jawa, diperlukan solusi energi bersih untuk mengurangi dampak lingkungan sambil memenuhi kebutuhan listrik. Penelitian ini bertujuan membandingkan dampak lingkungan dan ekonomi dari pembangkit listrik batu bara, nuklir, serta energi terbarukan (surya dan angin) guna menentukan sumber energi berkelanjutan. Metode *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) digunakan untuk menilai biaya per kilowatt-jam (Rp/kWh), emisi karbon per kilowatt-jam (g CO<sub>2</sub>eq/kWh), dan keandalan energi. Hasil menunjukkan bahwa energi nuklir unggul dengan emisi rendah, keandalan tinggi, dan biaya kompetitif dibandingkan batu bara dan energi terbarukan. Rekomendasi penelitian ini adalah menjadikan energi nuklir sebagai sumber utama, didukung EBT sebagai pelengkap, sambil mengurangi peran batu bara, sehingga transisi menuju sistem energi yang lebih bersih, andal, dan berkelanjutan di Pulau Jawa dapat tercapai.

**Kata kunci : Energi, Iklim, MCDA, Nuklir**

MUHAMMAD RAFLI KUMALA. A Comparative Study of the Environmental and Economic Impacts of Various Types of Power Plants on Java Island. Supervised by FINA BINAZIR MAZIYA, S.T., M.T

### **ABSTRACT**

*Climate change driven by high carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, especially from coal-fired power plants, is causing global temperature increases, extreme weather events, and ecosystem damage. With a high dependence on coal in Java, a cleaner energy solution is needed to reduce environmental impacts while meeting electricity demand. This study compares the environmental and economic impacts of coal, nuclear, and renewable energy sources (solar and wind) to determine the most sustainable energy source. The Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) method is used to evaluate the cost per kilowatt-hour (Rp/kWh), carbon emissions per kilowatt-hour (g CO<sub>2eq</sub>/kWh), and energy reliability. Results show that nuclear energy excels with low emissions, high reliability, and competitive costs compared to coal and renewables. This study recommends nuclear energy as the primary source, supported by renewables as a complementary option, while gradually reducing coal usage, thus achieving a transition to a cleaner, more reliable, and sustainable energy system in Java.*

**Keynote : Energy, Climate, MCDA, Nuclear**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR ISI

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| HALAMAN PENGESAHAN .....                          | iii  |
| PERNYATAAN.....                                   | iv   |
| KATA PENGANTAR .....                              | v    |
| ABSTRAK .....                                     | viii |
| <i>ABSTRACT</i> .....                             | ix   |
| DAFTAR ISI .....                                  | xi   |
| DAFTAR TABEL .....                                | xiv  |
| DAFTAR GAMBAR .....                               | xv   |
| BAB I PENDAHULUAN .....                           | 1    |
| 1.1 Latar Belakang.....                           | 1    |
| 1.2 Rumusan Masalah.....                          | 2    |
| 1.3 Tujuan .....                                  | 3    |
| 1.4 Manfaat.....                                  | 3    |
| 1.5 Ruang Lingkup.....                            | 3    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....                     | 5    |
| 2.1 Kebutuhan Energi Indonesia .....              | 5    |
| 2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) .....    | 6    |
| 2.3 Gas Rumah Kaca.....                           | 8    |
| 2.4 EBT (Energi Baru Terbarukan) .....            | 9    |
| 2.5 PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya).....   | 10   |
| 2.6 PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) .....   | 12   |
| 2.7 PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) ..... | 13   |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.8 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).....               | 15 |
| 2.9 Levelized Cost of Energy (LCOE).....                                | 16 |
| 2.10 Dampak Ekonomi Sosial .....                                        | 17 |
| 2.11 Multi-Criteria Decision Analysis .....                             | 18 |
| 2.12 Penelitian Terdahulu .....                                         | 20 |
| BAB III .....                                                           | 23 |
| 3.1 Kerangka Penelitian .....                                           | 23 |
| 3.2 Pengumpulan Data .....                                              | 25 |
| 3.3 Analisis Data .....                                                 | 27 |
| 3.3.1 Perhitungan Perbandingan Biaya .....                              | 27 |
| 3.3.2 Perbandingan dampak lingkungan .....                              | 29 |
| 3.3.3 Keandalan Energi .....                                            | 29 |
| 3.4 Pengolahan Data .....                                               | 30 |
| BAB 4 PEMBAHASAN .....                                                  | 36 |
| 4.1 Kondisi eksisting energi di pulau Jawa .....                        | 36 |
| 4.2 Analisis perbandingan operasional dan biaya pembangkit listrik..... | 38 |
| 4.2.1 Perbandingan operasional dan harga PLTU .....                     | 39 |
| 4.2.2 Perbandingan operasional dan Harga PLTN .....                     | 40 |
| 4.2.3 Perbandingan operasional dan harga PLTS .....                     | 42 |
| 4.2.4 Perbandingan operasional dan harga PLTB.....                      | 44 |
| 4.2.5 Perbandingan Harga Permbangkit Listrik.....                       | 46 |
| 4.3.1 Emisi karbon .....                                                | 48 |
| 4.3.2 Dampak limbah.....                                                | 52 |
| 4.4 Analisis Perbandingan Keandalan .....                               | 56 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| BAB 5 .....             | 59 |
| KESIMPULAN & SARAN..... | 59 |
| 5.1 Kesimpulan .....    | 59 |
| 5.2 Saran .....         | 60 |
| DAFTAR PUSTAKA .....    | 62 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2. 1 Dampak Ekonomi Mitigasi Energi .....                      | 18 |
| Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu .....                                | 20 |
| Tabel 3. 1 Pengumpulan Data Penelitian .....                         | 25 |
| Tabel 3. 2 Contoh Penggunaan MCDA .....                              | 32 |
| Tabel 4. 1 <i>Levelized Cost Of Electricity</i> PLTN .....           | 42 |
| Tabel 4. 2 <i>Levelized Cost Of Electricity</i> PLTB.....            | 45 |
| Tabel 4. 3 Perbandingan Harga Pembangkit Listrik 2022 .....          | 46 |
| Tabel 4. 4 Perbanding Harga Pembangkit Listrik per Kapita 2022 ..... | 47 |
| Tabel 4. 5 Perbandingan Emisi Karbon CO <sub>2</sub> -eq .....       | 50 |
| Tabel 4. 6 Analisis Pengolahan Limbah .....                          | 55 |
| Tabel 4. 7 Perbandingan Keandalan listrik .....                      | 56 |
| Tabel 4. 8 Analisi MCDA .....                                        | 57 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 Siklus Hidup Emisi CO <sub>2</sub> -eq.....                 | 16 |
| Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....                               | 24 |
| Gambar 3. 2 Siklus Hidup Emisi CO <sub>2</sub> -eq.....                 | 34 |
| Gambar 4. 1 Peta Sebaran Pembangkit Listrik di Pulau Jawa .....         | 37 |
| Gambar 4. 2 Operasional PLTU .....                                      | 39 |
| Gambar 4. 3 Operasional PLTN .....                                      | 41 |
| Gambar 4. 4 Cara kerja Sel Surya .....                                  | 43 |
| Gambar 4. 5 Cara Kerja Turbin Angin.....                                | 44 |
| Gambar 4. 6 Perbandingan Harga Pembangkit Listrik .....                 | 46 |
| Gambar 4. 7 Perbandingan Harga Pembangkit Listrik per Kapita 2022 ..... | 47 |
| Gambar 4. 8 Perbandingan Emisi Karbon CO <sub>2</sub> -eq.....          | 50 |
| Gambar 4. 9 Contoh Penanganan Limbah PLTN .....                         | 53 |

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia, sebagai salah satu negara berkembang dengan populasi yang besar dan pertumbuhan ekonomi yang pesat, menghadapi tantangan yang semakin serius terkait dengan kebutuhan akan energi dan dampak lingkungan. Ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil, seperti batu bara dan minyak bumi. Menurut laporan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), batu bara dan minyak bumi masih mendominasi bauran energi Indonesia. Hal ini ditunjukkan pada 2022, bauran batu bara yang merupakan bahan bakar utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) ini dalam energi primer nasional mencapai 40,46%, dan minyak bumi 30,18%. Sementara bauran gas bumi 16,28%, dan energi baru terbarukan (EBT) paling kecil, yakni 13,09% (ESDM, 2023). Dalam memenuhi kebutuhan energi listrik telah menyebabkan peningkatan emisi karbon yang signifikan, diketahui dalam tahun 2023 Indonesia menyumbang emisi karbon sebesar 6,2 juta ton karbon yang terkait dengan energi, 3,2 ton diantaranya dihasilkan dari kegiatan batubara dan gambut (BPS lingkungan hidup, 2023)

Karbon yang terus meningkat ini akan memberikan efek rumah kaca dampak negatif seperti pemanasan global, perubahan iklim, penurunan kualitas udara dan dampak negatif lainnya. Perubahan iklim yang dimaksud fenomena cuaca yang ekstrim. Perubahan iklim menyebabkan musim sulit diprediksi. Petani tidak dapat memprediksi perkiraan musim tanam akibat musim yang juga tidak menentu. Hal ini tentu berdampak terhadap roda perekonomian dan merugikan negara (Kemenkeu, 2024). Dampak global warming terhadap manusia mencakup berbagai risiko kesehatan dan lingkungan. Perubahan iklim meningkatkan risiko penyakit tular vektor seperti DBD, Malaria, dan Leptospirosis akibat curah hujan dan kelembapan yang mendukung

perkembangbiakan vektor. Selain itu, perubahan iklim menyebabkan krisis air bersih, meningkatkan penyakit yang ditularkan melalui air seperti diare. Produksi pangan juga terdampak oleh kekeringan dan gagal panen, yang mempengaruhi ketahanan gizi masyarakat. Kualitas udara yang buruk akibat perubahan iklim memicu penyakit tidak menular seperti asma dan kanker kulit. Lebih jauh, bencana alam seperti banjir dan kekeringan semakin sering terjadi, menambah tekanan fisik, ekonomi, dan kesehatan mental manusia (Kemenkes, 2024). Masih sangat banyak dampak negatif yang ditimbulkan oleh peningkatan karbon, hal ini menjadi urgensi kita untuk mempelajari dan memberikan solusi terhadap salah satu dampak lingkungan terbesar dalam sejarah manusia ini.

Dalam upaya untuk mengurangi dampak negatif dari sektor energi terhadap lingkungan, Indonesia telah mengambil langkah-langkah untuk diversifikasi sumber energi dan meningkatkan efisiensi energi. Alternatif yang sering dipertimbangkan adalah pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dan Energi Baru Terbarukan (EBT) seperti sel surya atau Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan turbin angin atau Pembangkit listrik Tenaga Bayu (PLTB), yang memiliki potensi untuk menghasilkan energi dengan emisi karbon yang rendah atau bahkan nol selama operasinya.

Namun, keputusan untuk mengadopsi teknologi nuklir dalam portofolio energi suatu negara tidak dapat diambil dengan sembarangan. Diperlukan pemahaman yang mendalam tentang potensi manfaat ekonomi dan risiko yang terkait dengan penggunaan PLTN, termasuk dampaknya terhadap emisi karbon, lingkungan, dan stabilitas ekonomi secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian yang membandingkan emisi karbon dan dampak ekonomi dari pembangkit listrik konvensional di Indonesia dengan potensi emisi karbon serta dampak ekonomi dari PLTN menjadi sangat relevan.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang tersebut, berikut perumusan masalah dalam

penelitian :

1. Apa keunggulan dan kelemahan masing-masing PLTU, EBT dan PLTN dalam hal emisi karbon, efisiensi energi, biaya operasional, keandalan pasokan energi, serta dampak sosial dan ekonominya?
2. Bagaimana perbandingan dampak lingkungan dan ekonomi antara PLTU, EBT dan PLTN ?.

### **1.3 Tujuan**

Berdasarkan rumusan masalah dan latar belakang tersebut, berikut tujuan pada penelitian :

1. Mengidentifikasi keunggulan dan kelemahan masing-masing PLTU, EBT dan PLTN dalam hal emisi karbon, efisiensi energi, biaya operasional, keandalan pasokan energi, serta dampak sosial dan ekonominya.
2. Menganalisis dampak lingkungan dari PLTU, EBT dan potensi PLTN, termasuk analisa karbon dan potensi risiko lingkungan dan ekonomi jangka panjang yang dapat ditimbulkan oleh keduanya.

### **1.4 Manfaat**

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah memberikan dasar kuat bagi pengembangan kebijakan energi berkelanjutan di Indonesia, khususnya dalam mempertimbangkan potensi pembangkit listrik bebas emisi karbon dan meningkatkan kemandirian energi negara.

### **1.5 Ruang Lingkup**

Peneliti memberi batasan batasan dalam penelitian ini guna membuat penelitian mudah dipahami dan dilaksanakan, berikut ruang lingkup penelitian :

1. Metode yang digunakan adalah kualitatif deskriptif
2. Semua data yang didapat merupakan data sekunder dari data data negara, jurnal penelitian terkait baik nasional dan internasional.
3. Sampel pembangkit listrik yang akan dibandingkan adalah PLTU,

PLTN, dan EBT. Untuk EBT yang dibandingkan adalah PLTS dan PLTB

4. Data diambil hanya dari pembangkit yang dimiliki negara
5. Parameter yang dibandingkan adalah harga, dampak lingkungan, dan keandalan
6. Harga dibandingkan dengan satuan Rp/kWh
7. Dampak lingkungan yang dibandingkan adalah emisi karbon dan limbah yang dihasilkan
8. Emisi karbon dibandingkan dengan satuan g CO<sub>2</sub>-eq/ kWh atau setara dengan ton CO<sub>2</sub> –eq/ gWh
9. Limbah dibandingkan dari dampak potensial dan kompleksitas pengolahannya
10. Keandalan dibandingkan dari reliabilitas untuk menghasilkan energi
11. Metode yang digunakan untuk membandingkan poin menggunakan *Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kebutuhan Energi Indonesia**

Listrik atau energi listrik merupakan salah satu hal terpenting guna kehidupan manusia modern yang memiliki peranan penting dalam perkembangan teknologi. Hampir semua aktivitas sehari-hari manusia akan berhubungan dengan listrik baik untuk kebutuhan rumah tangga hingga kebutuhan industri (Tanwir, 2019). Seiring dengan pertumbuhan penduduk diiringi dengan perkembangan teknologi, kebutuhan energi listrik semakin meningkat dan mengakibatkan pasokan energi listrik khususnya yang berasal dari energi fosil semakin menurun. Sebagian besar di Indonesia menggunakan sumber energi fosil sebagai sumber energi listrik utama yang berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap menggunakan fosil sebagai bahan yang ditransformasi adalah contoh listrik yang tidak dapat didaur ulang (Faizin, 2018)

Kebutuhan energi di Indonesia terus naik dari tahun ke tahun. Sampai dengan akhir tahun 2022 kapasitas pembangkit tenaga listrik yang terpasang sekitar 83.813,10 MW yang terdiri dari pembangkit PLN sebesar 42.495,10 MW dan Non PLN sebesar 41.318,00 MW. Dibandingkan dengan tahun 2021 sebesar 74.532,94 MW, maka kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik mengalami kenaikan sebesar 9.280,16 MW (ESDM, 2022). Data dari kementerian ESDM pada tahun 2022 menunjukkan bahwa bauran energi primer masih didominasi oleh batubara sebesar 42,38%, disusul minyak bumi sebesar 31,40%, gas 13,92% dan EBT sebesar 12,30%. Energi listrik di Indonesia masih sangat bergantung pada PLTU, setidaknya ada sekitar 253 PLTU aktif dan mensuplai kebutuhan energi baik dari kegiatan rumah tangga hingga industri..

## **2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)**

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menjadi bagian utama untuk kegiatan industri. Bahan bakar yang paling banyak digunakan oleh PLTU adalah batubara. Konsep dasar dari PLTU adalah bahwa ia harus menyediakan batubara sebagai bahan bakar utama dengan kualifikasi khusus yang dapat digunakan untuk jangka waktu yang lama, sehingga batubara dapat menghasilkan energi esensial yang dapat diubah menjadi energi listrik dengan bahan bakar tambahan atau minyak (Munawaroh, 2019).

Batubara sebagai salah satu komoditas utama dalam PLTU merupakan salah satu hasil tambang yang sangat sukses. Menurut ESDM pada tahun 2023, Indonesia menambang 775 juta ton batubara, Hasil ini naik 12,8% dari tahun 2022. Batubara berfungsi sebagai alat ekspor impor, diketahui 2023 sebanyak 518 juta ton diekspor, menyisakan 213 juta ton untuk kebutuhan dalam negeri seperti bahan bakar PLTU, perangkat elektronik dan lain sebagainya (ESDM, 2024). Memiliki pasokan batubara dan potensi tambang dan angka tambang yang masih terus naik membuat Indonesia masih bergantung pada PLTU untuk memenuhi kebutuhan listrik domestiknya. Sekitar 253 unit PLTU beroperasi di Indonesia (2023) dan tiap PLTU menghasilkan emisi karbon.

Menurut (Finahari, 2007) Ditinjau dari sisi emisi  $\text{CO}_2$ , pembakaran batubara mengemisi  $\text{CO}_2$  jauh lebih banyak dibanding minyak dan gas. Untuk itu perlu dilakukan sistem pengelolaan yang baik sehingga meskipun laju pembakaran batubara meningkat pesat, tetapi Isu lingkungan global tetap tidak boleh diabaikan. Emisi gas  $\text{CO}_2$  yang dihasilkan dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara dapat direduksi jumlahnya dengan melengkapi unit pembangkit dengan fasilitas pengolahan gas buang. Secara ringkas menurut buku Teknologi Pembangkit Tenaga Listrik (2020) oleh Ramdoni Syaputra, secara umum cara kerja PLTU dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pembongkaran Batubara: Batubara dari kapal dibongkar di dermaga, kemudian disimpan di area penyimpanan (*coal yard*).
2. Pemindahan ke Penghancur: Batubara diambil dan dibawa melalui ban berjalan menuju penghancur (*crusher*) untuk dipecah menjadi ukuran lebih kecil, lalu dialirkan ke silo batubara.
3. Penghalusan Batubara: Batubara dari silo dihancurkan menjadi bubuk halus dalam alat penghalus (*pulverizer*) untuk mempermudah pembakaran.
4. Pembakaran: Bubuk batubara dipanaskan, lalu dihembuskan bersama udara dari kipas utama menuju ruang pembakaran (*boiler*) untuk menghasilkan panas.
5. Pemanasan Boiler: Udara pembakaran disuplai oleh kipas dorong, membakar batubara di boiler yang mengubah air menjadi uap super panas.
6. Pemutaran Turbin: Uap panas bertekanan tinggi digunakan untuk memutar turbin tekanan tinggi, lalu uap dipanaskan ulang dan diarahkan ke turbin tekanan menengah dan rendah.
7. Penghasil Listrik: Turbin berputar bersamaan dengan generator yang menghasilkan energi listrik dari perubahan energi panas menjadi gerak dan kemudian menjadi listrik.
8. Kondensasi Uap: Uap bekas dari turbin tekanan rendah masuk ke kondensor, mengalami kondensasi, dan kembali menjadi air.
9. Siklus Tertutup: Air hasil kondensasi dipompa kembali ke boiler, memulai kembali siklus untuk menghasilkan uap panas yang diperlukan untuk terus memutar turbin.
10. Penambahan Air: Air tambahan dari tangki demineralisasi disuplai ke sistem untuk menggantikan air yang hilang karena kebocoran dalam siklus tertutup ini. Dengan sistem ini, PLTU secara berkesinambungan menghasilkan listrik dari pembakaran batubara dalam siklus yang berulang

### **2.3 Gas Rumah Kaca**

Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), emisi karbon ialah jumlah karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan gas-gas rumah kaca lainnya yang dilepaskan ke atmosfer sebagai hasil dari berbagai aktivitas manusia, termasuk pembakaran bahan bakar fosil, proses industri, pertanian, dan perubahan penggunaan lahan. Karbon dioksida adalah gas rumah kaca utama yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam untuk menghasilkan energi untuk transportasi, pembangkit listrik, dan keperluan industri.

Secara sederhana efek rumah kaca dapat dijelaskan dengan matahari sebagai pusat tata surya memberikan pengaruh yang besar bagi planet-planet yang ada termasuk bumi. Energi matahari memiliki pengaruh yang besar bagi kehidupan di bumi. Sebagian sinar matahari yang menuju ke bumi dibelokkan oleh atmosfer dan dipantulkan kembali ke luar angkasa dan sebagiannya lagi mencapai permukaan bumi dan dipantulkan ke atmosfer sebagai suatu jenis energi yang bergerak lambat dan disebut radiasi inframerah. Radiasi inframerah ini menyebabkan panas dan diserap oleh gas rumah kaca seperti uap air, karbon dioksida, ozon serta metana yang kemudian terjebak di atmosfer sehingga terus mempengaruhi kenaikan suhu di permukaan bumi (Lapenanga, 2016)

Semakin banyak jumlah karbon yang dilepaskan ke atmosfer, semakin parah dan kompleks dampaknya bagi lingkungan, masyarakat, dan ekonomi global. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi emisi karbon dan mengatasi perubahan iklim telah menjadi prioritas global yang mendesak. Adapun dampak yang dapat terjadi adalah pemanasan secara global. Pemanasan global ini akan menyebabkan perubahan seperti suhu air laut akan meningkat dan mengakibatkan peningkatan penguapan di udara. Perubahan-perubahan ini pada akhirnya menghasilkan perubahan iklim yang mencakup perubahan dalam pola dan unsur cuaca secara berkelanjutan dan dalam jangka waktu yang lama (Kusumawardhani, 2015). Iklim sendiri merujuk pada rata-rata kondisi fisik udara, seperti suhu, tekanan, kelembaban, hujan, angin, dan sebagainya, selama kurun waktu tertentu seperti harian, mingguan, bulanan, musiman, dan tahunan. Untuk menangani hal itu maka dibutuhkan sumber energi yang baru dan mengeluarkan sedikit emisi karbon.

## **2.4 EBT (Energi Baru Terbarukan)**

Sumber energi baru dalam Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi telah diklasifikasikan macam-macam jenis energi baru, yakni nuklir, hidrogen, gas metana batu bara (*coal bed methane*), batu bara tercairkan (*liquified coal*), dan batu bara tergaskan (*gasified coal*). Dalam hal penguasaan dan pengaturannya, sumber energi baru diserahkan oleh rakyat kepada negara dan dimanfaatkan sebesar-besarnya untuk sebesar-besarnya kemakmuran rakyat (Menhan, 2023).

Pengertian energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber energi terbarukan. Sumber energi terbarukan adalah sumber energi yang dapat digunakan tanpa batas waktu dan tidak akan pernah habis karena dapat dipulihkan dalam waktu relatif singkat. Menurut Undang-undang Nomor 30 Tahun tentang Energi, pengertian energi terbarukan tercantum pada pasal 1 ayat (6), yakni “ sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang berkelanjutan jika dikelola dengan baik, antara

lain panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran dan terjunan air, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut.” Sumber energi terbarukan adalah sumber energi yang sangat ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan pencemaran lingkungan dan tidak termasuk salah satu penyebab dari perubahan iklim dan pemanasan global, karena energi yang dihasilkan berasal dari proses alam yang berkelanjutan seperti angin, air, sinar matahari, panas bumi, dan biofuel. Negara Indonesia adalah negara yang memiliki potensi sumber energi terbarukan dalam jumlah yang sangat besar karena pengaruh astronomis dan geografis negara Indonesia. Potensi sumber energi terbarukan yang terkandung di Indonesia seperti energi panas bumi, surya, air, laut/samudra, bioenergi (Menhan, 2023).

Menurut laporan PLN, pada tahun 2021 Indonesia memiliki 421 unit pembangkit listrik energi terbarukan dengan total kapasitas terpasang 4.189 megawatt (MW). Pembangkit energi terbarukan terbesar berada di Jawa, yakni di wilayah kerja PT Indonesia Power dengan total kapasitas terpasang 1.499,61 MW. Terdiri dari PLTA 1.119,52 MW, PLTM 3,33 MW, dan PLTP 376,76 MW. Meski angkanya mencapai ribuan MW, menurut *International Renewable Energy Agency* (IRENA) kapasitas terpasang energi terbarukan di Indonesia masih sangat kecil, bahkan baru 0,3% dari seluruh potensi yang tersedia. IRENA menilai hambatan besar di sektor ini adalah kurangnya investasi.

## **2.5 PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya)**

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem yang memanfaatkan energi matahari untuk menghasilkan listrik. Prinsip kerjanya sangat bergantung pada sel surya, yang menggunakan sinar matahari untuk menghasilkan energi listrik dengan bantuan bahan semikonduktor seperti silikon. Ketika sinar matahari mengenai permukaan sel surya, foton dari cahaya tersebut mengubah energi radiasi menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Dalam sistem PLTS, energi yang dihasilkan berbentuk listrik arus searah (DC), yang kemudian dapat diubah menjadi arus bolak-balik (AC) melalui inverter jika

diperlukan, untuk digunakan dalam perangkat rumah tangga atau disalurkan ke jaringan listrik. Meskipun PLTS bekerja paling optimal di bawah sinar matahari langsung, sistem ini tetap dapat menghasilkan listrik meskipun cuaca mendung selama masih ada cukup cahaya (Kumara, 2018).

Struktur sel surya dan komponen utama sel surya terdiri dari lapisan tipis bahan semikonduktor, yang umumnya terbuat dari silikon. Sel surya memiliki dua lapisan dengan muatan berbeda, yaitu lapisan negatif (*n-type*) dan lapisan positif (*p-type*), yang masing-masing berfungsi untuk mendonorkan dan menerima elektron. Struktur ini memungkinkan terjadinya pemisahan muatan ketika foton matahari mengenai permukaan sel. Ketika cahaya diterima, elektron dari pita valensi akan meloncat ke pita konduksi, menghasilkan pasangan elektron dan *hole*. Lapisan antirefleksi pada permukaan sel surya juga membantu mengurangi pantulan cahaya, sehingga meningkatkan efisiensi sel surya dalam menyerap foton. Dengan demikian, sel surya dapat mengubah energi cahaya menjadi energi listrik (Wulandari, 2008).

Proses kerja sel surya ketika sel surya terkena sinar matahari, foton dari cahaya tersebut mempengaruhi elektron yang ada dalam bahan semikonduktor. Elektron ini meloncat dari pita valensi ke pita konduksi, yang menyebabkan terbentuknya aliran arus listrik. Jika sel surya dihubungkan dengan sirkuit eksternal, arus listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk memberi daya pada perangkat atau disimpan dalam baterai untuk penggunaan di masa depan. Arus listrik yang dihasilkan ini adalah arus DC (*Direct Current*). Besarnya arus listrik yang dihasilkan bergantung pada intensitas cahaya yang diterima oleh sel surya. Semakin tinggi intensitas cahaya yang mengenai sel, semakin besar jumlah foton yang diserap, yang menghasilkan lebih banyak pasangan elektron dan *hole*, dan semakin besar pula arus yang dihasilkan (Wulandari, 2008).

Efisiensi sel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk intensitas cahaya dan panjang gelombang cahaya yang jatuh pada permukaan sel. Semakin tinggi intensitas cahaya, semakin banyak foton yang diterima oleh sel surya, yang pada gilirannya menghasilkan lebih banyak pasangan elektron dan *hole*. Selain itu, panjang gelombang cahaya juga mempengaruhi energi foton,

dengan cahaya yang memiliki panjang gelombang pendek (seperti cahaya biru) memiliki energi foton yang lebih tinggi, yang dapat menghasilkan lebih banyak energi. Oleh karena itu, pemilihan lokasi pemasangan PLTS yang menerima sinar matahari dengan intensitas tinggi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi konversi energi sel surya ( Wulandari, 2008).

## **2.6 PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu)**

Sumber energi terbarukan yang memanfaatkan angin untuk menghasilkan listrik. Teknologi ini bekerja dengan mengonversi energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui generator. PLTB merupakan salah satu solusi ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi dunia yang terus meningkat tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca. Di Indonesia, potensi pemanfaatan energi angin cukup besar, terutama di daerah pesisir dan wilayah dengan kecepatan angin tinggi ( Kemedikbud, 2015).

Komponen utama PLTB meliputi turbin angin, tiang penyangga, dan generator. Turbin angin terdiri dari baling-baling yang dirancang untuk menangkap energi angin, kemudian menggerakkan rotor yang terhubung dengan generator. Tiang penyangga berfungsi untuk menopang turbin di ketinggian tertentu, sehingga dapat menangkap angin dengan kecepatan optimal. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan teknologi pengendali yang memastikan turbin beroperasi secara efisien dan aman meskipun kecepatan angin bervariasi (Kemedikbud,2015).

Untuk mengetahui cara kerja PLTB dengan sistematis, dapat menggunakan model SKEA (Sumber, Energi, Konversi Energi, dan Aplikasi)

1. Sumber Energi (Angin) : Energi angin, sebagai sumber energi utama, dihasilkan oleh pergerakan udara akibat perbedaan tekanan udara di atmosfer. Angin dengan kecepatan tertentu diarahkan ke baling-baling turbin angin. Lokasi PLTB dipilih berdasarkan potensi angin yang optimal, dengan mempertimbangkan faktor seperti arah angin dominan dan kecepatan rata-rata harian.

2. Konversi Energi: Energi Kinetik ke Energi Mekanik: Baling-baling turbin menangkap energi kinetik dari angin. Gerakan baling-baling ini memutar rotor melalui poros utama. Dalam banyak kasus, gear box digunakan untuk meningkatkan kecepatan putaran rotor, sehingga generator dapat beroperasi lebih efisien. Energi Mekanik ke Energi Listrik: Generator yang terhubung dengan rotor *gearbox* mengubah energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan prinsip elektromagnetik. Proses ini menghasilkan listrik dengan tegangan tertentu.
3. Aplikasi (Distribusi Listrik): Energi listrik yang dihasilkan dilewatkan ke transformator untuk disesuaikan dengan kebutuhan jaringan distribusi. Setelah itu, listrik dialirkan ke jaringan utama atau langsung ke pengguna lokal, tergantung pada desain sistem PLTB. Teknologi ini memungkinkan pemanfaatan energi terbarukan untuk kebutuhan listrik rumah tangga, industri, atau infrastruktur lainnya.

## **2.7 PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir)**

Indonesia diharapkan dapat mencapai puncak emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada tahun 2030 dan kemudian menurun secara signifikan hingga mencapai Net Zero Emission (NZE) pada 2060, lebih cepat maka akan lebih baik. Skenario ini memerlukan upaya bersama untuk mengurangi emisi dari sektor energi hingga mendekati nol, seperti yang tertera dalam Indonesia's Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (LTS-LCCR 2050). Nuklir menjadi salah satu opsi yang memungkinkan sebagai energi alternatif. Berdasarkan penelitian nuklir merupakan energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan apabila dikelola dengan cermat ( Brook dkk , 2014),.

Banyak negara yang berhasil memanfaatkan nuklir sebagai energi alternatif seperti Rusia, Iran, Prancis, dan Amerika. Beberapa daerah di Indonesia seperti Kalimantan Barat, Bangka Belitung, dan Riau memiliki cadangan uranium yang cukup melimpah (Syaeful dkk, 2021) Indonesia memulai keseriusannya dalam mengkaji nuklir dengan membangun lembaga

dan pusat studi nuklir di Serpong, Bandung, dan Yogyakarta.

Hingga saat ini, kajian terkait nuklir masih terus berjalan seperti pemetaan sebaran uranium, menentukan kesesuaian lokasi PLTN, dan pengelolaan limbah radioaktif (Putri dkk, 2022;). Langkah tersebut merupakan upaya serius guna memaksimalkan potensi yang ada. Penggunaan nuklir diharapkan mewujudkan Net Zero Emission di Indonesia untuk masa yang akan datang (Holechek dkk, 2022).

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu sumber energi yang memanfaatkan reaksi nuklir untuk menghasilkan listrik. Cara kerja PLTN umumnya dibagi menjadi beberapa tahap utama yang melibatkan reaktor nuklir, sistem pendingin, generator uap, turbin, dan sistem perlindungan radiasi (shielding). Berikut adalah penjelasan tentang cara kerja PLTN secara umum, dengan fokus pada jenis inland (berlokasi di darat) dan konvensional (Henri, 2023)

1. Reaktor Nuklir : Reaktor nuklir adalah inti dari PLTN, di mana reaksi fisi (pembelahan) inti uranium-235 atau plutonium-239 terjadi. Dalam reaktor, neutron dilepaskan untuk memicu pembelahan inti atom, menghasilkan energi panas yang sangat besar. Reaksi ini dikontrol oleh batang kendali (*control rods*) yang dapat disisipkan atau ditarik untuk mengatur jumlah neutron dan laju reaksi.
- 2 Sistem Pendingin : Sistem pendingin berfungsi untuk mengangkut panas yang dihasilkan dari reaktor. Biasanya, air bertekanan tinggi atau gas digunakan sebagai fluida pendingin. Dalam PLTN inland, air pendingin diambil dari sungai atau danau terdekat, sementara dalam desain konvensional, air pendingin mungkin diambil dari laut atau sumber lainnya jika PLTN berlokasi dekat pantai.
- 3 Shielding (Sistem Perlindungan Radiasi) :Sistem shielding adalah komponen penting yang melindungi pekerja dan lingkungan dari radiasi yang dihasilkan selama reaksi nuklir. Shielding biasanya terbuat dari bahan-bahan seperti timbal, beton tebal, atau air yang dapat menyerap dan mengurangi radiasi. Dalam PLTN, reaktor vessel dan struktur bangunan

umumnya dirancang dengan lapisan shielding untuk memastikan radiasi tidak keluar ke lingkungan sekitar.

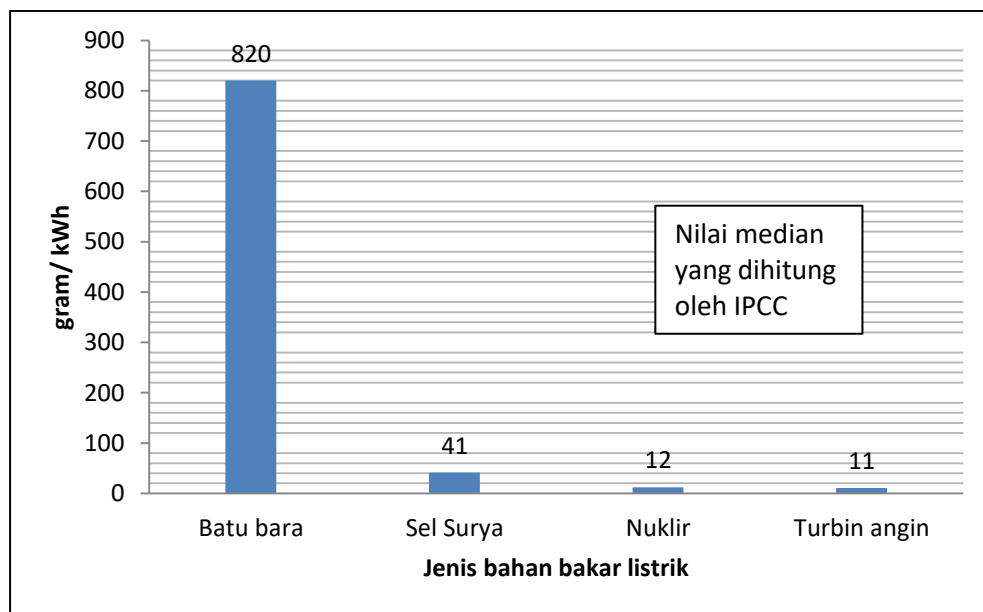
- 4 Generator Uap :Panas yang dihasilkan dalam reaktor nuklir memanaskan air dalam sistem pendingin hingga berubah menjadi uap. Dalam desain konvensional, air bertekanan dari reaktor mengalir melalui generator uap (heat exchanger), di mana panas ditransfer ke sirkuit sekunder berisi air yang kemudian berubah menjadi uap bertekanan tinggi.
- 5 Turbin dan Generator : Uap bertekanan tinggi yang dihasilkan kemudian dialirkan ke turbin. Energi panas dalam uap menggerakkan bilah-bilah turbin, mengubah energi panas menjadi energi mekanis. Turbin yang berputar kemudian menggerakkan generator, menghasilkan listrik.
- 6 Sistem Kondensasi: Setelah melewati turbin, uap yang sudah kehilangan sebagian besar energinya didinginkan dan dikondensasikan kembali menjadi air di kondensor. Dalam desain inland, air pendingin yang digunakan untuk mengkondensasikan uap biasanya didaur ulang melalui menara pendingin (cooling tower) atau dilepaskan kembali ke sumber air terdekat setelah melalui sistem penyejuk.
- 7 Distribusi Listrik: Listrik yang dihasilkan oleh generator kemudian dialirkan ke transformator untuk meningkatkan tegangan agar dapat disalurkan melalui jaringan listrik nasional. Listrik ini kemudian didistribusikan ke konsumen melalui jaringan transmisi dan distribusi.

## **2.8 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**

IPCC merupakan sebuah badan antar pemerintah yang didirikan pada tahun 1988 oleh Organisasi Meteorologi Dunia (WMO) dan Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP). Tujuan utama IPCC adalah memberikan penilaian ilmiah tentang perubahan iklim, dampaknya terhadap lingkungan, serta opsi mitigasi dan adaptasi yang tersedia. Laporan-laporan IPCC sering menjadi dasar kebijakan iklim global, termasuk Kesepakatan Paris 2015, karena menyajikan pengetahuan ilmiah terkini yang mendalam dan komprehensif tentang isu-isu iklim (IPCC, 2011).

Laporan-laporan IPCC telah menunjukkan peningkatan pemahaman ilmiah tentang perubahan iklim dari waktu ke waktu, memperkuat bukti bahwa aktivitas manusia merupakan penyebab utama pemanasan global. Melalui analisis data iklim, model pemodelan, dan skenario emisi. Salah satu nya adalah median nilai karbon yang dihasilkan dari berbagai jenis pembangkit listrik, berikut gambaran dari salah satu laporan IPCC

:



**Gambar 2. 1 Siklus Hidup Emisi CO<sub>2</sub>-eq**  
(Sumber : IPCC)

## 2.9 Levelized Cost of Energy (LCOE)

Ukuran yang digunakan untuk mengevaluasi biaya pembangkitan energi selama masa operasi pembangkit listrik, mencakup seluruh biaya investasi, operasi, pemeliharaan, serta bahan bakar, yang dibagi dengan jumlah energi yang dihasilkan. Menurut *International Energy Agency* (IEA), LCOE digunakan untuk membandingkan berbagai sumber energi, termasuk energi terbarukan dan bahan bakar fosil, dalam konteks biaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit energi listrik. LCOE memberikan pandangan komprehensif terhadap daya saing teknologi energi berdasarkan kondisi pasar dan kebijakan yang berlaku (IAE, 2020).

Sebagai contoh, berdasarkan laporan IEA terbaru, LCOE untuk pembangkit listrik tenaga angin di darat (*onshore*) di beberapa negara berkembang berkisar antara \$30–\$50/MWh, lebih kompetitif dibandingkan LCOE pembangkit listrik berbasis batubara yang mencapai \$50–\$80/MWh. Contoh ini menunjukkan bahwa energi terbarukan semakin bersaing dengan bahan bakar fosil, terutama di daerah dengan potensi sumber daya alam yang tinggi dan dukungan kebijakan yang kuat (IAE, 2020).

## **2.10 Dampak Ekonomi Sosial**

Penggunaan energi nuklir dan energi baru terbarukan (EBT) memiliki dampak ekonomi dan sosial yang signifikan, terutama dalam konteks penciptaan lapangan kerja. Energi nuklir, misalnya, membutuhkan tenaga kerja yang sangat terlatih untuk operasi dan pemeliharaan reaktor, yang mencakup insinyur, teknisi, dan ilmuwan. Sementara itu, pengembangan infrastruktur nuklir juga memerlukan banyak tenaga kerja di sektor konstruksi dan manufaktur. Di sisi lain, EBT seperti tenaga surya dan angin menciptakan lapangan kerja di berbagai sektor termasuk penelitian dan pengembangan (R&D), manufaktur, instalasi, dan pemeliharaan. Peningkatan pangsa energi terbarukan di Tiongkok, sektor tenaga listrik mencatatkan penambahan bersih sebanyak 472.000 lapangan kerja pada tahun 2010. Untuk jumlah tenaga yang dihasilkan yang sama, tenaga surya fotovoltaik (solar PV) membutuhkan hingga 18 kali lebih banyak tenaga kerja dibandingkan dengan nuklir dan 7 kali lebih banyak dibandingkan dengan tenaga angin (IPCC, 2018)

Selain penciptaan lapangan kerja, penggunaan energi nuklir dan EBT juga memiliki implikasi terhadap biaya energi dan harga barang serta jasa. Energi nuklir memerlukan investasi awal yang besar untuk pembangunan reaktor dan infrastruktur pendukungnya, tetapi setelah beroperasi, biaya produksi listrik relatif stabil dan rendah. Namun, risiko terkait dengan limbah radioaktif dan potensi kecelakaan nuklir bisa menambah biaya yang tidak langsung, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi harga energi.

Sebaliknya, biaya teknologi EBT seperti angin dan surya telah menurun drastis dalam beberapa dekade terakhir, membuat listrik dari sumber-sumber ini semakin kompetitif dengan bahan bakar fosil dan nuklir. Penurunan biaya ini, dikombinasikan dengan insentif pemerintah, dapat mengurangi biaya energi secara keseluruhan dan menstabilkan harga barang dan jasa di pasar. Dalam tabel 2.1 terdapat analisis yang dilakukan IPCC terhadap dampak sosial ekonomi mitigasi pembangkit listrik (IPCC, 2018) :

**Tabel 2. 1** Dampak Ekonomi Mitigasi Energi

| Jenis Energi Mitigasi dari batu bara             | Ekonomi                                                                                                                                                                                                                                                    | Sosial                                                                                                                                                                                                   | Keterangan Tambahan                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nuklir                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Investasi awal sangat tinggi, tetapi harga energi stabil dalam jangka panjang</li> <li>Biaya operasional rendah setelah pembangunan selesai</li> <li>Membuka lowongan kerja baru untuk tenaga ahli lokal</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kekhawatiran masyarakat terhadap limbah radioaktif dan risiko keselamatan</li> <li>Stabilitas energi meningkatkan kualitas hidup dan akses yang merata</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>mendorong pengelolaan limbah yang aman dan ketat</li> <li>Memerlukan tenaga kerja dengan keterampilan khusus</li> </ul>           |
| EBT (Angin, Surya, Bioenergi, Hidro, Panas bumi) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Biaya investasi awal beragam tergantung teknologi</li> <li>Harga energi dapat fluktuatif karena ketergantungan pada cuaca</li> <li>Membuka lowongan kerja lokal dengan skala yang besar</li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Energi bersih meningkatkan kualitas lingkungan jangka panjang</li> <li>Mebutuhkan tanah yang sangat luas, mengancam relokasi penduduk</li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Perlu integrasi penyimpanan energi untuk mengatasi fluktuasi harga</li> <li>Mendukung ketahanan iklim dan emisi rendah</li> </ul> |

## 2.11 Multi-Criteria Decision Analysis

MCDA adalah suatu metode yang digunakan untuk mengevaluasi berbagai alternatif pilihan berdasarkan beberapa kriteria yang berbeda. MCDA berfungsi sebagai alat yang membantu pengambil keputusan dalam situasi kompleks, di mana terdapat banyak faktor yang harus dipertimbangkan secara simultan. Dengan MCDA, berbagai kriteria yang memiliki dampak pada hasil akhir dapat diidentifikasi, diprioritaskan, dan dibandingkan sehingga memudahkan proses pengambilan keputusan yang lebih informatif dan objektif. MCDA biasanya diterapkan dalam berbagai sektor, seperti energi, transportasi, manajemen lingkungan, dan industri lainnya, di mana keputusan sering kali membutuhkan evaluasi dari berbagai aspek ( Alijoyo, 2021).

Dalam proses MCDA, setiap kriteria yang relevan diberikan bobot berdasarkan tingkat kepentingannya relatif terhadap tujuan keseluruhan. Setelah bobot ditetapkan, masing-masing alternatif dinilai atau diberi skor terhadap setiap kriteria yang ada. Skor-skor ini kemudian dikalikan dengan bobot masing-masing kriteria untuk menghitung nilai total dari setiap alternatif. Hasil akhir menunjukkan alternatif yang memiliki skor tertinggi sebagai opsi yang paling sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Dengan demikian, MCDA tidak hanya membantu dalam pemilihan alternatif terbaik, tetapi juga memungkinkan transparansi dalam proses evaluasi, sehingga semua pilihan dapat dianalisis secara menyeluruh dan hasilnya dapat dipertanggung jawabkan.

## 2.12 Penelitian Terdahulu

Untuk mempermudah memahami penelitian ini, Tabel 2.2 merangkum penelitian terdahulu dengan tema yang relevan :

**Tabel 2. 2** Penelitian Terdahulu

| Judul Penelitian                                                       | Penulis                                                 | Hasil Penelitian                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Perhitungan Faktor Emisi CO <sub>2</sub> PLTU Batubara dan PLTN (2013) | Rizki Firmansyah Setya Budi dan Suparman, 2013, BANTAN. | hasil perhitungan diperoleh faktor emisi untuk masing-masing pembangkit adalah sebagai berikut: PLTU Banten 1,033 kg/kWh, PLTU Indramayu 1,002 kg/kWh, PLTU Rembang 1,136 kg/kWh, dan PLTN 0 kg/kWh. Faktor emisi CO <sub>2</sub> rata-rata adalah 1,05kg/kWh, dan faktor tersebut dipengaruhi oleh efisiensi termal pembangkit, NCV bahan bakar yang digunakan, dan kandungan karbon (% C) dalam bahan bakar.<br><br>Pembangkitan daya sebesar 1700 MWyr dengan menggunakan PLTU Banten, Indramayu, dan Rembang akan menghasilkan CO <sub>2</sub> sebesar 16 ribu kTon. Bila pembangkitan daya tersebut |

|                                                                               |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                               |                                      | <p>diganti dengan 2 unit PLTN 1000 MWe maka emisi CO<sub>2</sub> akan berkurang sebesar 16 ribu kTon. Data faktor emisi PLTU Batubara dan PLTN ini sangat membantu untuk menghitung emisi CO<sub>2</sub> dalam sebuah perencanaan sistem kelistrikan opsi nuklir.</p> <p>Perencanaan sistem kelistrikan opsi nuklir merupakan salah satu misi dari Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) BATAN</p> |
| Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan dan Fosil (2014) | Edwaren Liun dan Sunardi, BATAN 2014 | <p>pengembangan beberapa jenis sumber energi menunjukkan prospek yang potensial di masa depan berdasarkan pertimbangan kemajuan teknologi yang efisien. Biaya produksi listrik dengan energi angin sangat bervariasi yang tergantung pada faktor kapasitas dan ukuran unit dan negara lapangan angin, yaitu berkisar antara 85 – 250 \$/MWh. Sedangkan biaya produksi dengan</p>                     |

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>kondisi angin yang baik sekitar 12 sen\$/kWh. Nilai ini bervariasi, tergantung pada faktor kapasitas dan negara tempat berada pembangkit. Biaya energi surya berkisar sekitar 37,73 sen\$/kWh, Biaya produksi dari energi batubara dan nuklir masing-masing berkisar antara 5 - 9 sen\$/kWh dan 2,9 - 8,2 sen\$/kWh. Nilai ini berada pada batas-batas normal yang umum di berbagai negara, yang mana Korea Selatan menghasilkan biaya terendah dan Eropa Barat biaya tertinggi.</p> |
|--|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## **BAB III**

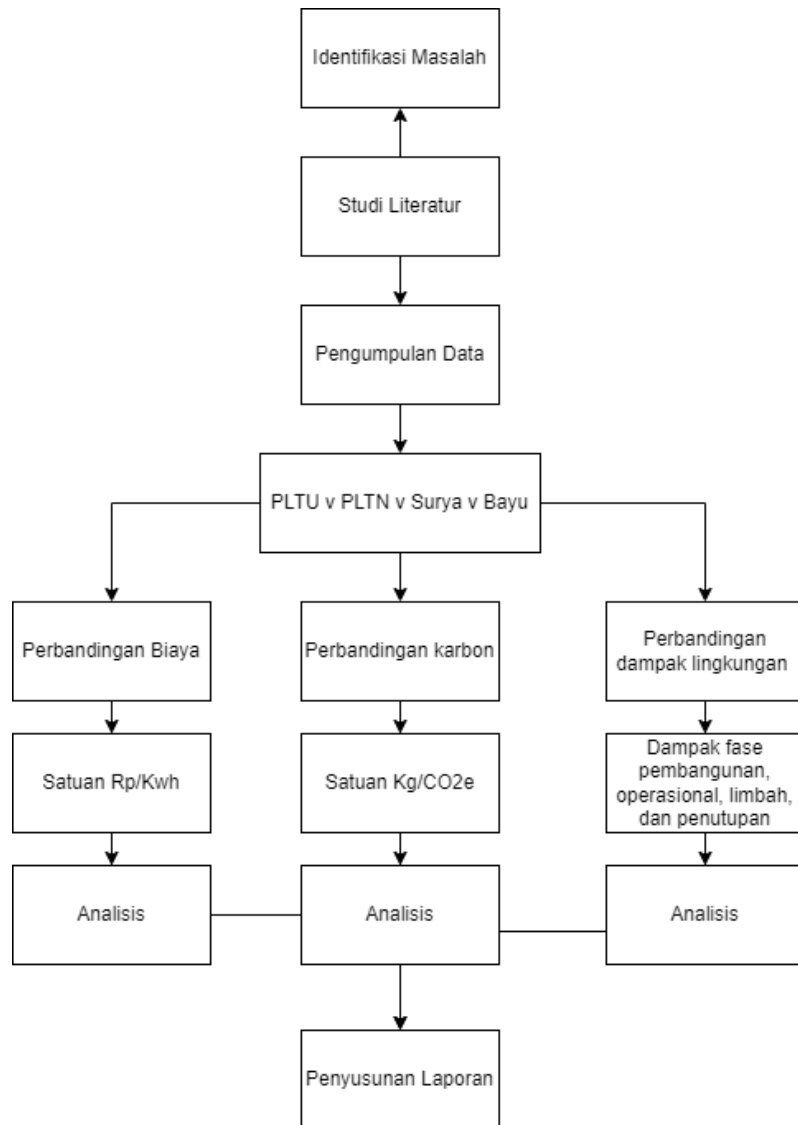
### **METODE PENELITIAN/PERENCANAAN**

#### **3.1 Kerangka Penelitian**

Jenis penelitian ini adalah penelitian deskriptif. Metode deskriptif kualitatif dapat diartikan sebagai prosedur pemecahan masalah yang diselidiki dengan menggambarkan keadaan subjek atau objek dalam penelitian dapat berupa orang, lembaga, masyarakat dan yang lainnya yang pada saat sekarang berdasarkan fakta-fakta yang tampak atau apa adanya. Menurut Nazir (1988) dalam “Buku Contoh Metode Penelitian”, metode deskriptif merupakan suatu metode dalam meneliti status sekelompok manusia, suatu objek, suatu set kondisi, suatu sistem pemikiran ataupun suatu kelas peristiwa pada masa sekarang. Tujuan dari penelitian deskriptif ini adalah untuk membuat deskripsi, gambaran, atau lukisan secara sistematis, faktual dan akurat mengenai fakta-fakta, sifatsifat serta hubungan antar fenomena yang diselidiki.

Pendekatan yang digunakan untuk menggambarkan dan menginterpretasikan karakteristik dari fenomena atau populasi yang sedang diteliti tanpa membuat kesimpulan kausal. Dalam konteks membandingkan jenis jenis pembangkit listrik, metodologi deskriptif dapat digunakan untuk memberikan gambaran rinci tentang masing-masing jenis pembangkit listrik berdasarkan berbagai kriteria. Kriteria evaluasi atau faktor-faktor atau parameter yang digunakan untuk menilai dan membandingkan berbagai opsi atau alternatif dalam suatu proses pengambilan keputusan. Dalam konteks membandingkan pembangkit listrik diatas kriteria evaluasi membantu mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan masing-masing jenis pembangkit listrik berdasarkan aspek-aspek yang penting seperti biaya, dampak

lingkungan, dan keandalan. Gambar 3.1 memperlihatkan diagram alir penelitian untuk mempermudah pemahaman penelitian



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Pengumpulan Data

Metode penelitian yang menggabungkan pengumpulan dan perbandingan data dari arsip negara seperti Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) serta Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), bersama dengan referensi dari jurnal-jurnal ilmiah, dapat menghasilkan analisis yang kaya dan komprehensif.

Pertama, menentukan sampel menentukan sampel yang akan diuji. Untuk penelitian ini, sampel terdiri dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), serta Energi Baru Terbarukan (EBT) yang diwakili oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Pemilihan sampel ini bertujuan untuk membandingkan kelebihan dan kekurangan masing-masing jenis pembangkit listrik terkait dampak lingkungan, seperti emisi dan limbah yang dihasilkan, serta aspek ekonomi.

Kedua, pengumpulan data dari jurnal-jurnal ilmiah memungkinkan peneliti untuk mengakses penemuan terbaru dalam bidang energi dan sumber daya. Melalui tinjauan literatur yang cermat, peneliti dapat menemukan studi empiris, analisis kebijakan, dan tinjauan teoritis yang relevan dengan topik penelitian mereka. Tabel 3.1 menampilkan data yang dikumpulkan guna mempermudah penelitian :

**Tabel 3. 1** Pengumpulan Data Penelitian

| No. | Jenis Data      | Sumber                                                                                                                                |
|-----|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Penjelasan PLTU | <i>Multi-objective optimization on total cost and carbon dioxide emission of coal supply for coal-fired power plants in Indonesia</i> |

|    |                                     |                                                                                                                               |
|----|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                     | (2021), <i>LIGNITE COAL FIRED POWER PLANT</i><br>(2023)                                                                       |
| 2  | Penjelasan PLTN                     | Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Di Indonesia Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission<br>(2023)                          |
| 3  | Penjelasan EBT                      | Energi Baru dan Terbarukan (EBT) Sebagai Teknologi Alternatif Dimasa Depan Dalam Mendukung Pertahanan Negara, Kemenhan (2023) |
| 4  | Penjelasan PLTS                     | Pengenalan PLTS, ITPLN (2021)                                                                                                 |
| 5  | Penjelasan PLTB                     | TEKNOLOGI PLTB, Kemendikbud (2015)                                                                                            |
| 6  | Pembiayaan PLTU                     | STATISTIK PLN 2022<br>(2022)                                                                                                  |
| 7  | Pembiayaan PLTN                     | Perhitungan Faktor Emisi Co <sub>2</sub> PLTU Batubara dan PLTN Batan (2015),                                                 |
| 8  | Pembiayaan PLTS                     | STATISTIK PLN 2022<br>(2022)                                                                                                  |
| 9  | Pembiayaan PLTB                     | <i>International Energy Agency</i> (2020)                                                                                     |
| 10 | Penjelasan perhitungan Emisi karbon | <i>The Intergovernmental</i>                                                                                                  |

|    |                                 |                                                                                   |
|----|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                 | <i>Panel on Climate Change (2014)</i>                                             |
| 11 | Penjelasan sistem skorisng MCDA | <i>Multi-criteria Decision Analysis Analisis Keputusan Multikriteria (2021)</i>   |
| 12 | Penjelasan keandalan EBT        | Evaluasi Keandalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang Terhubung ke Grid (2016), |

Setelah data dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah membandingkan informasi yang ditemukan dari sumber-sumber berbeda tersebut. Perbandingan ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi kesenjangan, persamaan, atau inkonsistensi antara data dari arsip negara dan temuan dalam literatur akademis. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengandalkan satu sumber informasi, tetapi memperoleh pemahaman yang lebih mendalam dengan membandingkan berbagai perspektif.

### 3.3 Analisis Data

#### 3.3.1 Perhitungan Perbandingan Biaya

Sejauh mana potensi sumber energi ini dapat diandalkan dalam hal ini diukur dan dianalisis menurut keekonomian. Untuk itu metodologi yang diterapkan adalah analisis terhadap masing-masing sumber energi. Analisis dilakukan melalui beberapa cara, yakni perbandingan langsung atas informasi/data aktual yang telah tersedia yang dianggap otentik. Sedangkan informasi yang tidak menyediakan nilai akhir memerlukan analisis secara kuantitatif, yaitu perhitungan yang dilakukan dengan menerapkan persamaan konversi hingga didapatkan angka dalam satuan \$ per kWh. Satuan energi kWh

dipilih karena merupakan hasil konversi paling akhir dalam proses penyediaan energi pada konsumen. Perhitungan masing-masing energy adalah sebagai berikut :

1. Energi Surya dan Angin :

Energi surya dapat diperoleh secara gratis, karena matahari dapat menyinari sebagian besar permukaan bumi. Namun untuk mengkonversi energi surya dibutuhkan peralatan yang harganya cukup mahal, sehingga biaya yang dibutuhkan cukup tinggi untuk per satuan energi listrik yang diproduksi. Energi angin juga diperoleh gratis, namun untuk mengkonversi dibutuhkan instalasi yang membutuhkan biaya cukup mahal per satuan energi listrik yang diproduksi. Biaya energi angin didasarkan pada persamaan biaya total yang di dapatkan dari investasi awal dan penyediaan mesin lalu di bagi dengan energi yang dihasilkan dalam waktu yang ditentukan.

2. Energi Batubara

Energi listrik dari batubara dibangkitkan melalui proses produksi uap dengan pembakaran batubara. Pembangkit listrik berbahan bakar batubara (PLTU batubara) dapat membangkitkan listrik dalam skala besar. Biaya produksi listrik tergantung pada biaya investasi pembangkit dan harga bahan bakarnya. Dalam kajian ini biaya produksi listrik didasarkan pada data/informasi dari berbagai sumber.

3. Energi Nuklir

Pembangkit listrik tenaga nuklir bekerja dengan banyak kesamaan seperti seperti pembangkit berbahan bakar fosil, kecuali bahwa didalam reaktor nuklir berlangsung "reaksi berantai" yang memproduksi panas sebagai gantinya. Reaktor menggunakan batang uranium sebagai bahan bakar, dan panas dihasilkan oleh fisi nuklir.

Sebagian besar biaya pembangkitan listrik dengan tenaga nuklir (PLTN) berasal dari investasi pembangunan instalasi yang tergolong mahal. Sedangkan biaya bahan bakar tergolong murah. Di samping itu juga ada biaya operasi dan perawatan. Analisis untuk biaya produksi listrik

dari PLTN berdasarkan data dan informasi berbagai sumber.

### **3.3.2 Perbandingan dampak lingkungan**

Untuk menganalisis dampak lingkungan dari suatu pembangkit listrik, ada dua aspek utama yang perlu dipertimbangkan: emisi karbon dan limbah yang dihasilkan. Emisi karbon dihitung berdasarkan jumlah karbon dioksida ekuivalen (CO<sub>2</sub>eq) yang dilepaskan ke atmosfer. Penilaian ini mengikuti ketentuan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) yang menggunakan satuan gram CO<sub>2</sub>eq per kilowatt-hour (gCO<sub>2</sub>eq/kWh) untuk mengukur intensitas emisi. Semakin tinggi jumlah CO<sub>2</sub>eq yang dihasilkan per kWh, semakin besar dampak negatif terhadap lingkungan karena kontribusi terhadap perubahan iklim dan peningkatan efek rumah kaca.

Selain emisi karbon, aspek lain yang perlu dianalisis adalah limbah yang dihasilkan dari proses pembangkitan energi. Limbah ini mencakup segala bentuk material sisa yang tidak dapat digunakan kembali, baik dalam bentuk padat, cair, maupun gas. Dalam penilaian dampak limbah, faktor-faktor seperti volume, tingkat toksisitas, dan daya tahan limbah di lingkungan diperhitungkan. Kompleksitas pengelolaan limbah juga memainkan peran penting; limbah yang sulit dikelola, beracun, atau memiliki masa hancur yang panjang akan cenderung memiliki dampak lingkungan yang lebih besar. Oleh karena itu, pembangkit listrik dengan tingkat produksi limbah yang tinggi atau limbah berbahaya cenderung memiliki peringkat dampak lingkungan yang lebih buruk. Untuk memberikan analisis komprehensif, kedua aspek ini—emisi karbon dan limbah—dapat dipertimbangkan secara bersama-sama guna menentukan keseluruhan dampak lingkungan dari pembangkit listrik.

### **3.3.3 Keandalan Energi**

Untuk menganalisis keandalan energi, hal pertama yang perlu diperhatikan adalah kapasitas pembangkit untuk memenuhi kebutuhan listrik secara konsisten dan jangka panjang. Keandalan ini mencakup kemampuan pembangkit untuk beroperasi secara terus-menerus tanpa gangguan atau penurunan output yang signifikan. Pembangkit yang mampu menghasilkan listrik secara stabil dengan

sedikit ketergantungan pada faktor eksternal cenderung memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi. Di sisi lain, beberapa jenis pembangkit sangat dipengaruhi oleh variabilitas sumber daya, sehingga keandalannya juga tergantung pada teknologi penyimpanan energi dan sistem cadangan yang digunakan.

Selain itu, keandalan energi juga diukur dari respons pembangkit listrik terhadap fluktuasi beban atau kemampuannya untuk menyesuaikan output sesuai dengan permintaan. Pembangkit yang dapat menyesuaikan output dengan cepat lebih andal dalam memenuhi permintaan puncak atau kebutuhan darurat. Oleh karena itu, penilaian keandalan harus mempertimbangkan jenis pembangkit, ketersediaan sumber daya, dan kemampuannya untuk menanggapi perubahan dalam permintaan energi, yang semuanya berperan penting dalam memastikan pasokan energi yang stabil dan memadai.

### **3.4 Pengolahan Data**

Metode yang digunakan dalam studi ini merupakan metode Analisis Data Sekunder. Sehingga data yang diperlukan diperoleh dari dokumen-dokumen disederhanakan ke dalam bentuk yang mudah dibaca dan diinterpretasi. Tahap ini merupakan tahap mengolah data untuk membuat interpretasi data dari hasil studi yang dilakukan. Salah satu nya dengan mengolah data dalam bentuk skoring. Sistem skoring dinilai mudah dipahami dengan menyajikan tabel dengan bobot dan skor dengan ketentuan yang jelas, contoh sistem skoring yang mudah dipahami *Multicriteria Decision Analysis* (MCDA).

Menurut Anttonius Alijoyo dkk (2021) dalam Analisis Keputusan Multikriteria yang di publis CRMS, MCDA adalah pendekatan yang komprehensif, bagaimana seorang pembuat keputusan menentukan keputusan mana yang memiliki kemungkinan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan alternatif keputusan lainnya. Teknik MCDA adalah metode yang membantu organisasi dalam menyusun dan memilih keputusan yang paling sesuai dengan kondisi yang ada. Tujuan utamanya adalah mendukung pembuat keputusan

dalam menentukan pilihan yang tepat sesuai situasi yang dihadapi, karena setiap keputusan bersifat unik. Keputusan yang sama dalam kondisi berbeda dapat menghasilkan hasil yang berbeda. Karena tidak ada solusi optimal yang berlaku untuk semua situasi, teknik MCDA membantu pembuat keputusan menilai dan memilih alternatif yang paling cocok untuk diterapkan sesuai kondisi saat itu (Alijoyo dkk, 2021)

Dalam jurnal yang sama, Alijoyo juga menjelaskan bagaimana cara menggunakan MCDA untuk membuat sebuah keputusan dari banyak pilihan, berikut alir penggunaan dalam bentuk poin :

1. Menentukan Sasaran: Tetapkan sasaran yang jelas dan relevan untuk memastikan keputusan sesuai dengan tujuan organisasi dan menghindari konflik kepentingan.
2. Menentukan Kriteria: Pilih kriteria penting yang akan menjadi dasar keputusan, misalnya harga, teknologi, biaya pemeliharaan, dll., yang sesuai dengan sasaran yang ditetapkan.
3. Membuat Pembobotan Kriteria: Berikan bobot pada setiap kriteria berdasarkan tingkat kepentingannya terhadap sasaran; semakin penting, semakin tinggi bobotnya.
4. Membuat Penilaian atau Skoring: Beri nilai pada alternatif berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan, untuk membandingkan pilihan yang ada.
5. Menentukan Rekomendasi: Pilih alternatif dengan nilai tertinggi sebagai rekomendasi utama, dengan alternatif lain sebagai cadangan jika diperlukan

Dari keterangan poin poin diatas dapat disimpulkan menjadi rumus yaitu :

$$\text{Skor} = \text{Nilai} \times \text{bobot} \%$$

$$\text{Total skor} = \sum \text{skor}$$

Dalam tabel 3.2 terdapat contoh sederhana penggunaan MCDA dalam menentukan untuk memilih *handphone* yang sesuai dengan harga dan

funksinya :

**Tabel 3. 2 Contoh Penggunaan MCDA**

| Kriteria   | Bobot | HP A<br>(Nilai x Bobot) | HP B<br>(Nilai x Bobot) |
|------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Harga      | 50%   | 4 (2)                   | 5 (2,5)                 |
| Kamera     | 30%   | 5 (1,5)                 | 3 (0,9)                 |
| Baterai    | 20%   | 3 (0,6)                 | 4 (0,8)                 |
| Total Skor | 100%  | 4,1                     | 4,2                     |

Berdasarkan contoh diatas Dalam contoh ini, HP B memiliki total skor tertinggi (4,2) dan direkomendasikan sebagai pilihan utama karena lebih unggul dalam harga dan baterai, meskipun kameranya sedikit lebih rendah daripada HP A

Contoh sederhana di atas menunjukkan bagaimana MCDA membantu membandingkan beberapa opsi dengan mempertimbangkan kriteria yang penting. Metode ini juga bisa diterapkan dalam pengambilan keputusan yang lebih kompleks, seperti memilih jenis pembangkit listrik yang paling sesuai untuk kebutuhan energi, yaitu pembangkit listrik tenaga uap, tenaga nuklir, dan energi baru terbarukan. Dengan MCDA, kita dapat menilai masing-masing jenis pembangkit berdasarkan kriteria seperti biaya, dampak lingkungan, dan efisiensi, sehingga memudahkan pengambil keputusan dalam memilih opsi terbaik sesuai tujuan jangka panjang energi

MCDA melibatkan beberapa langkah sistematis untuk membandingkan alternatif berdasarkan beberapa kriteria

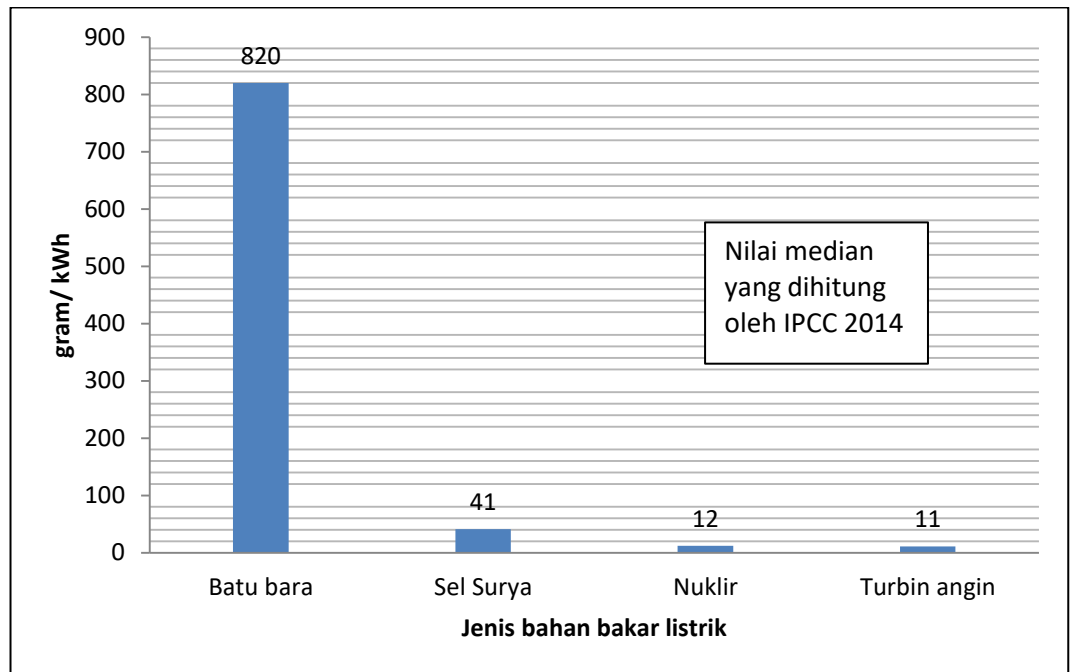
1. Identifikasi kriteria evaluasi yang relevan, seperti biaya, dampak lingkungan, keandalan, dan keamanan.
2. Tentukan bobot untuk setiap kriteria berdasarkan kepentingannya relatif terhadap tujuan evaluasi.
3. Berikan skor untuk setiap alternatif (misalnya, PLTU, PLTN,

EBT) pada setiap kriteria menggunakan skala penilaian tertentu.

4. Hitung skor tertimbang untuk setiap alternatif dengan mengalikan skor setiap kriteria dengan bobot kriteria tersebut dan menjumlahkan hasilnya.
5. Bandingkan skor tertimbang dari semua alternatif untuk menentukan pilihan terbaik berdasarkan analisis komprehensif ini.

Kriteria dan pembobotan MCDA dibagi dalam 3 kategori utama yaitu biaya, dampak lingkungan, keandalan, dan keamanan. Pemberian didasarkan proposif pada kepentingan relatif setiap kriteria terhadap tujuan keseluruhan dari analisis dan prioritas yang ditetapkan oleh pembuat keputusan. Berikut adalah alasan untuk memberikan bobot tertentu pada kriteria biaya, dampak lingkungan, keandalan,

1. Biaya (40%) : Biaya sering kali menjadi faktor utama dalam pengambilan keputusan untuk proyek energi, terutama karena melibatkan investasi awal yang besar serta biaya operasional dan pemeliharaan yang berkelanjutan. Tingginya bobot ini mencerminkan pentingnya memastikan bahwa proyek tersebut secara finansial layak dan ekonomis dalam jangka panjang. Dalam banyak kasus, ketersediaan anggaran dan pembiayaan menentukan kelanjutan proyek.
1. Dampak Lingkungan (40%): Dampak lingkungan dari pembangkit listrik menjadi perhatian utama dalam era kesadaran perubahan iklim dan keberlanjutan. Pemberian bobot 40% mencerminkan keprihatinan terhadap emisi gas rumah kaca, polusi, dan limbah yang dihasilkan. Salah satu dampak lingkungan adalah emisi karbon, dalam penelitian ini emisi karbon yang dihasilkan berpacu pada standar dari *the United Nations (UN) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Gambar 3.2 mengambarkannya :



**Gambar 3. 2** Siklus Hidup Emisi CO<sub>2</sub>-eq

2. Keandalan (20%) : Keandalan adalah faktor penting dalam memastikan kontinuitas pasokan listrik. Pembangkitan listrik yang andal diperlukan untuk memenuhi permintaan energi tanpa gangguan. Bobot 20% menunjukkan bahwa meskipun penting, keandalan sedikit kurang kritis dibandingkan biaya dan dampak lingkungan, tetapi tetap esensial untuk menjaga stabilitas dan kepuasan konsumen.

Sistem skoring dalam MCDA adalah proses evaluasi di mana setiap alternatif dinilai berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan, menggunakan skala numerik yang konsisten seperti 1 hingga 10, di mana 10 adalah nilai terbaik. Berikut contoh penjelasan nilai skoring :

- Skor 1 (Sangat Buruk): Kualitas terendah, dampak negatif tinggi, sulit diperbaiki.
- Skor 2 (Buruk): Performa jauh di bawah standar, banyak kekurangan, perbaikan sulit
- .Skor 3 (Cukup Buruk): Di bawah standar dengan kelemahan nyata, perbaikan mungkin tapi sulit.

- Skor 4 (Di Bawah Standar): Hampir rata-rata, masih ada kekurangan, perbaikan lebih mudah.
- Skor 5 (Cukup/Rata-Rata): Memenuhi standar minimum, tanpa keunggulan atau masalah besar.
- Skor 6 (Sedikit Di Atas Rata-Rata): Kualitas cukup baik, ada nilai tambah kecil.
- Skor 7 (Baik): Di atas standar, manfaat lebih dari cukup, kekurangan sangat sedikit.
- Skor 8 (Sangat Baik): Kualitas hampir optimal, sedikit kelemahan minor.
- Skor 9 (Luar Biasa): Hampir sempurna, kualitas tinggi dengan dampak positif kuat.
- Skor 10 (Sempurna): Performa terbaik, memenuhi semua harapan tanpa kekurangan.

Setelah menetapkan bobot untuk setiap kriteria berdasarkan kepentingannya, alternatif-alternatif yang dievaluasi diberi skor pada setiap kriteria. Skor ini mencerminkan seberapa baik setiap alternatif memenuhi kriteria tersebut. Skor untuk setiap kriteria kemudian dikalikan dengan bobot kriteria untuk menghasilkan skor tertimbang. Skor tertimbang ini dijumlahkan untuk setiap alternatif, menghasilkan total skor tertimbang yang memungkinkan perbandingan langsung antar alternatif. Sistem skoring ini memberikan pendekatan terstruktur dan kuantitatif untuk mengidentifikasi pilihan terbaik berdasarkan berbagai aspek yang relevan

## **BAB 4**

### **PEMBAHASAN**

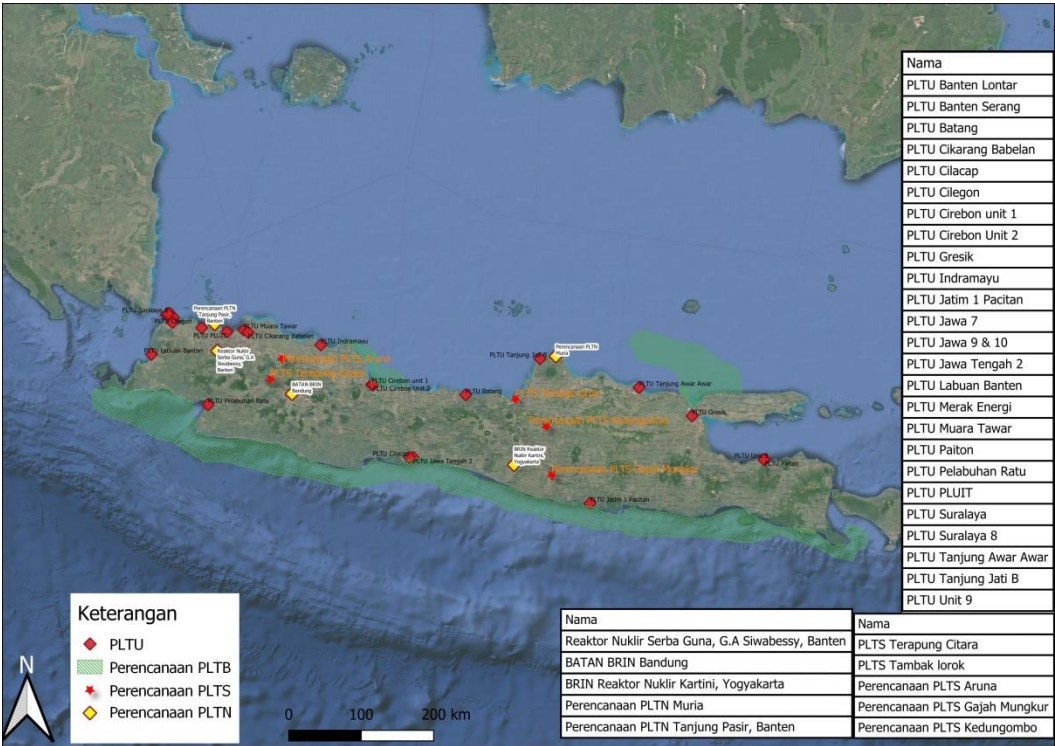
#### **4.1 Kondisi eksisting energi di pulau Jawa**

Pulau Jawa menjadi pusat kegiatan ekonomi dan pemerintahan di Indonesia, yang mencakup berbagai sektor industri, pemerintahan, dan permukiman. Sebagai pulau terpadat dengan tingkat urbanisasi tinggi, Jawa memainkan peran vital dalam penggerak ekonomi nasional. Infrastruktur industri besar sebagian besar terletak di Jawa, begitu juga dengan pusat pemerintahan dan kebijakan negara. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS) pulau Jawa adalah rumah untuk Pulau Jawa dihuni oleh 151,6 juta jiwa atau 56,10 persen penduduk Indonesia. Dengan kepadatan aktivitas tersebut, kebutuhan energi di Jawa menjadi sangat penting untuk mendukung produktivitas yang tinggi. Oleh karena itu, penelitian energi yang berfokus pada Jawa akan memberikan dampak yang lebih luas bagi kesejahteraan masyarakat Indonesia secara keseluruhan.

Pentingnya menjaga ketersediaan energi untuk memenuhi kebutuhan masyarakat di Jawa semakin mendesak. Ketersediaan energi yang stabil dan terjangkau sangat diperlukan untuk menjamin kelangsungan berbagai aktivitas, dari industri hingga rumah tangga. Pengembangan sumber energi baru dan terbarukan juga harus diselaraskan dengan kebutuhan energi yang meningkat di pulau ini. Tanpa pengelolaan energi yang baik, risiko defisit energi di Jawa dapat menghambat perkembangan industri dan kesejahteraan penduduk yang pada akhirnya mengganggu perekonomian nasional.

Kondisi energi saat ini di Jawa masih didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yang menyumbang persentase besar dalam pembangkit listrik nasional. Berdasarkan data statistik PLN 2022 29,57 % energi yang dihasilkan berasal dari PLTU masih menjadi sumber energi utama, karena

kapasitasnya yang besar dan stabil. Gambar 4.1 memperlihatkan lokasi-lokasi PLTU dan penyebaran di Jawa yang didapatkan dari penelusuran citra satelit melalui google maps, google earth dan kemudian disajikan melalui aplikasi QGIS :



**Gambar 4. 1** Peta Sebaran Pembangkit Listrik di Pulau Jawa  
(Sumber : Qgis 3.3)

Menurut peta sebaran diatas, lokasi PLTU ini tersebar dengan posisi yang jauh dari permukiman penduduk guna mengurangi dampak lingkungan. Pembangunan PLTU membutuhkan lahan yang luas, untuk mengakomodasi siklus operasional seperti transportasi batubara, gudang penyimpanan, dan fasilitas operasional lainnya. Selain PLTU, gambaran data energi ini juga memuat lokasi eksisting dari PLTS dan reaktor nuklir, serta rencana pembangunan untuk PLTS, PLTB, dan PLTN sesuai dengan rencana potensi pembangunan Kementerian ESDM .

Untuk PLTS, diharapkan dapat dikembangkan dalam bentuk PLTS terapung di area perairan seperti danau dan waduk sesuai dengan RUPTL 2021-2030 saat ini, semua danau, waduk dan bendungan yang ada di Pulau Jawa akan masuk dalam rencana penyediaan listrik melalui PLTS Terapung. Adapun contoh eksisting adalah PLTS terapung Citara di Purwakarta dan PLTS terapung yang direncanakan selanjutnya ialah PLTS Gajah Mungkur di Wonogiri. Untuk PLTB, perluasan dapat dilakukan di area selatan Jawa yang memiliki potensi angin memadai, seperti yang diterapkan di negara-negara maju Eropa. Hal ini merujuk kepada survey yang dilakukan ESDM pada tahun 2021 yang menunjukkan bahwa daerah yang diarsir di gambar 4.1, memiliki kecepatan angin paling tinggi dan paling dekat dengan daratan yaitu 5 – 6 m/s, cocok untuk merencanakan turbin angin *offshore*. PLTN yang mengacu pada penelitian BATAN seperti Reaktor Kartini yang membuktikan keamanan teknologi nuklir di Indonesia, dan diharapkan pengembangannya dapat terus mengikuti data dan perencanaan pemerintah. Lokasi PLTN pada gambar 4.1 juga diambil dari potensi pembangunan PLTN yang diteliti oleh BATAN.

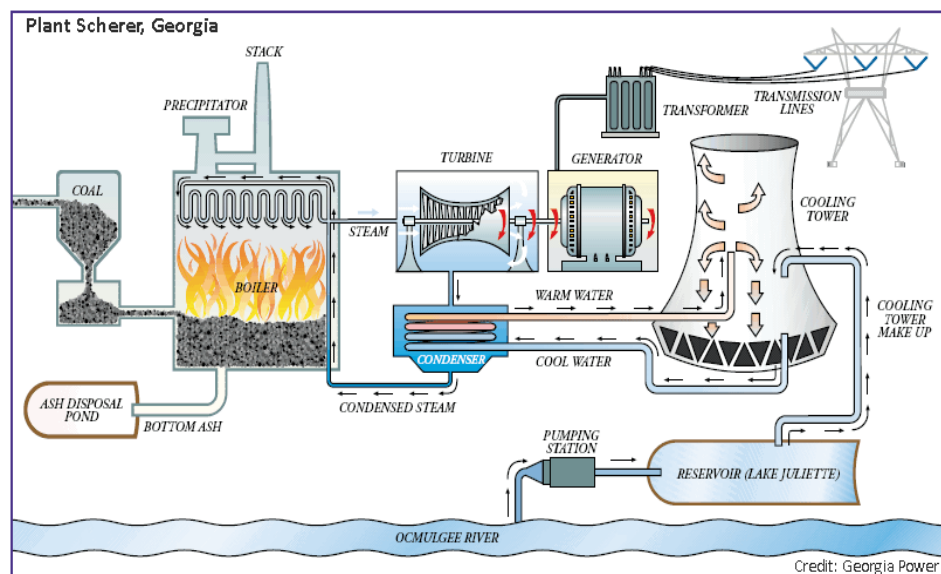
#### **4.2 Analisis perbandingan operasional dan biaya pembangkit listrik**

Melakukan perbandingan operasional energi adalah langkah penting untuk memahami cara kerja, kelebihan dan kekurangan secara umum. Ini membantu pemerintah, perusahaan, dan konsumen dalam membuat keputusan yang tepat mengenai pilihan pembangkit listrik yang tepat.. Hal ini dilakukan dengan membandingkan kegiatan operasional dan cara kerja nya.

Perbandingan harga energi merupakan langkah esensial untuk memastikan efisiensi biaya dan mendukung keberlanjutan ekonomi. Proses ini dilakukan dengan meninjau harga yang harus dibayarkan oleh pengguna listrik dalam satuan Rp/KWh, satuan ini dipilih karena merupakan satuan yang bisa dibandingkan antar jenis pembangkit listrik dan berefek langsung kepada pembayar listrik tersebut.

#### 4.2.1 Perbandingan operasional dan harga PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menggunakan batubara sebagai bahan bakar utama untuk menghasilkan listrik melalui beberapa tahapan. Proses dimulai dengan penggilingan batubara menjadi serbuk halus agar lebih mudah dibakar di dalam boiler. Batubara yang telah halus dibakar di boiler, menghasilkan panas yang digunakan untuk memanaskan air hingga berubah menjadi uap bertekanan tinggi. Uap ini kemudian dialirkan ke turbin uap, yang bergerak dan memutar generator. Generator inilah yang mengubah energi mekanik dari perputaran turbin menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Gambar 4.2 memperlihatkan skema sederhana kinerja PLTU.



**Gambar 4. 2** Operasional PLTU  
(Sumber : U.S. Geological Survey, 2018)

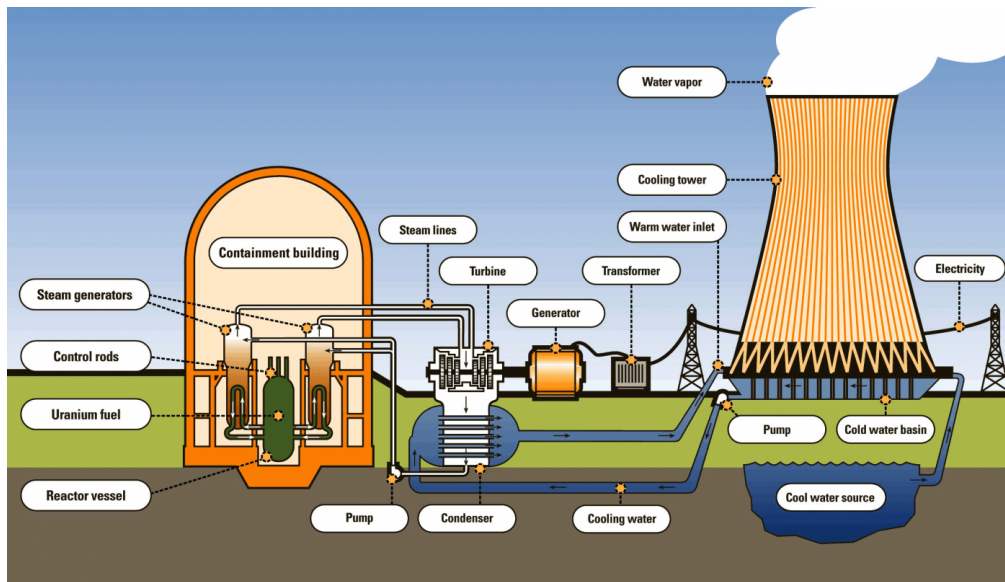
Setelah uap digunakan untuk memutar turbin, uap ini didinginkan dan dikondensasikan kembali menjadi air melalui sistem pendinginan, lalu dipompa kembali ke boiler untuk digunakan kembali dalam siklus berikutnya. Listrik kemudian di distribusikan kepada pelanggan seperti kegiatan rumah tangga dan industri, pelanggan tersebut membayar penyedia listrik yang dihasilkan pembangkit listrik sesuai dengan jenis dan kebutuhannya.

Harga energi listrik umumnya dihitung dalam satuan kilowatt-jam (kWh), yaitu jumlah energi yang digunakan selama satu jam oleh alat listrik berdaya 1 kilowatt. Untuk menghasilkan listrik, pembangkit seperti PLTU memerlukan biaya yang mencakup berbagai komponen, termasuk biaya bahan bakar (seperti batubara), perawatan alat-alat utama seperti boiler, turbin uap, dan generator, serta investasi awal untuk membangun fasilitas seperti *boiler house*, *cooling tower*, *coal yard* (area penyimpanan batubara), dan jaringan distribusi listrik. Semua biaya ini dijumlahkan dan dibagi dengan jumlah energi listrik yang dihasilkan, menghasilkan angka harga per kWh.

Menurut data statistik PLN tahun 2022, biaya produksi listrik di Pembangkit Listrik Tenaga Uap PLTU tercatat sebesar 737,42 rupiah per kWh. Angka ini mencerminkan biaya yang diperlukan untuk mengoperasikan PLTU, termasuk pengadaan bahan bakar batubara, pemeliharaan infrastruktur, serta pengelolaan limbah yang dihasilkan.

#### **4.2.2 Perbandingan operasional dan Harga PLTN**

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) bekerja dengan memanfaatkan reaksi fisi nuklir untuk menghasilkan panas, yang kemudian diubah menjadi energi listrik. Dalam PLTN, bahan bakar utama yang digunakan adalah uranium, yang ditempatkan dalam reaktor nuklir. Di dalam reaktor ini, atom-atom uranium dibelah (fisi) dengan melepaskan energi dalam bentuk panas. Panas yang dihasilkan kemudian digunakan untuk memanaskan air hingga berubah menjadi uap bertekanan tinggi. Uap ini kemudian dialirkan ke turbin uap yang berputar, dan perputaran turbin ini menggerakkan generator, yang mengubah energi mekanik menjadi listrik. Gambar 4.3 memperlihatkan gambaran umum sebuah PLTN.



**Gambar 4. 3** Operasional PLTN  
(Sumber : *Grow Safety Institute*, 2023 )

Untuk menjalankan proses ini, PLTN memerlukan sejumlah alat penting seperti reaktor nuklir, turbin, generator, kondensor, serta sistem pendinginan dan sistem penanganan limbah radioaktif. Uranium yang digunakan dalam bentuk pelet disusun dalam batang bahan bakar di reaktor. Reaksi fisi yang terjadi menghasilkan panas yang sangat tinggi, dan air yang mengalir di sekitar reaktor digunakan untuk mengekstraksi panas tersebut. Setelah uap menggerakkan turbin, uap didinginkan kembali melalui kondensor menjadi air dan dikembalikan ke sistem untuk digunakan kembali, sementara energi listrik yang dihasilkan oleh generator disalurkan melalui jaringan listrik

Indonesia belum memiliki data tentang PLTN, oleh karena itu guna mengetahui harga atau biaya operasional PLTN, *International Energy Agency* (IEA) dan sub divisi nya yaitu *Nuclear Energy Agency* (NEA) yang merupakan perkumpulan negara seperti Amerika Serikat, Rusia, Eropa, Australia, Korea, Jepang dan negara-negara yang menggunakan energi nuklir untuk saling bertukar informasi tentang energi nuklir termasuk mengenai pembiayaannya (IEA, 2020).

Harga untuk pembangkit listrik dapat biasa disebut *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) atau harga yang sudah disetarakan. Untuk mendapatkan harga ini dihitung dengan investasi awal, harga bahan bakar, operasional dan

pemeliharaan dibagi dengan energi yang dihasilkan maka dari itu satuan yang digunakan adalah \$ (biaya) / kWh. IEA sudah melakukan perhitungan untuk LCOE PLTN dengan jangka waktu lama 20 tahun (IEA,2020). Tabel 4.1 untuk keterangan lebih lanjut.

**Tabel 4. 1** *Levelized Cost Of Electricity* PLTN

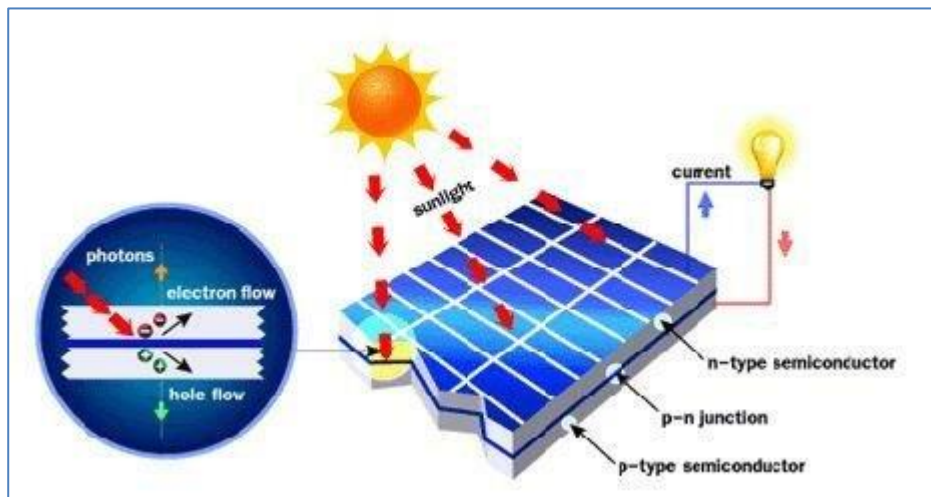
| Negara          | Biaya LCOE (USD/MWh) | Biaya LCOE (USD/kWh) |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| Amerika Serikat | 71,50                | 0,0715               |
| Prancis         | 71,10                | 0,0711               |
| China           | 66,01                | 0,0660               |
| Korea Selatan   | 53,30                | 0,0533               |
| Rusia           | 53,30                | 0,0533               |
| Jepang          | 86,60                | 0,0866               |
| Rata - rata     | 66,97                | 0,067                |

(Sumber : IEA, 2020)

Berdasarkan tabel diatas dapat disimpulkan bahwa harga yang dijual oleh PLTN, jika melihat negara yang sudah menggunakan teknologi nuklir, rata – rata nya adalah 0,0670 USD/kWh atau 1.045 Rp/kWh pada tahun 2022

#### 4.2.3 Perbandingan operasional dan harga PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atau sel surya bekerja dengan mengubah energi matahari menjadi energi listrik menggunakan prinsip efek fotovoltaiik. Sel surya, yang terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon, menyerap cahaya matahari. Ketika foton (partikel cahaya) dari sinar matahari mengenai permukaan sel surya, energi dari foton tersebut melepaskan elektron dalam semikonduktor, menciptakan aliran elektron yang dikenal sebagai arus listrik. Proses ini terjadi dalam modul fotovoltaiik. Gambar 4.4 untuk gambaran cara kerja sel surya modul fotovoltaiik.



**Gambar 4. 4** Cara kerja Sel Surya

(Sumber : Parera dkk, 2020)

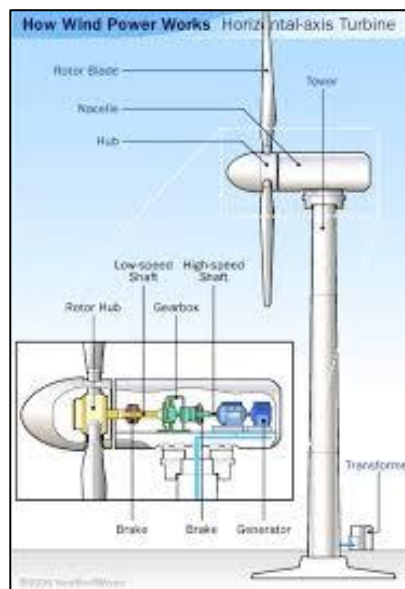
Sel surya bekerja dengan menggunakan dua jenis silikon semikonduktor, yaitu *N-type* dan *P-type*, yang digabungkan untuk membentuk sebuah *junction PN*. Pada *N-type* silikon, elemen seperti fosfor ditambahkan untuk memberikan kelebihan elektron, sementara pada *P-type silikon*, elemen seperti boron ditambahkan untuk menciptakan kekosongan atau "lubang" elektron. Ketika cahaya matahari mengenai sel surya, foton dari sinar matahari memberikan energi yang cukup untuk menggerakkan elektron dari *N-type* ke *P-type*, melalui junction tersebut. Pergerakan elektron ini menciptakan aliran listrik atau arus

Proses ini disebut efek fotovoltaiik, di mana energi cahaya diubah langsung menjadi energi listrik. Pada sel surya, arus yang dihasilkan berupa arus searah (DC), dan biasanya diubah menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter, agar bisa digunakan dalam jaringan listrik. Penggabungan *N-type* dan *P-type* silikon adalah inti dari bagaimana sel surya dapat menangkap energi dari cahaya matahari dan mengubahnya menjadi listrik yang dapat digunakan. PLTS membutuhkan panel surya yang terdiri dari banyak modul sel surya, serta baterai penyimpanan untuk menyimpan energi listrik yang tidak terpakai, sehingga bisa digunakan saat matahari tidak bersinar. Energi listrik yang dihasilkan oleh inverter kemudian dialirkan melalui jaringan distribusi untuk digunakan atau disimpan di sistem baterai cadangan.

Berdasarkan data statistik PLN tahun 2022, biaya produksi listrik di PLTS di Indonesia mencapai 1.034 rupiah per kWh. Biaya ini mencerminkan pengeluaran yang diperlukan untuk membangun dan mengoperasikan fasilitas PLTS, termasuk investasi dalam panel surya, sistem penyimpanan energi, serta pemeliharaan dan pengelolaan yang berkelanjutan.

#### 4.2.4 Perbandingan operasional dan harga PLTB

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik. PLTB dapat dibangun di daratan (*onshore*) atau di lepas pantai (*offshore*), dengan komponen utama berupa turbin angin yang terdiri dari baling-baling, rotor, nacelle (rumah mesin), menara, *gearbox*, dan generator. Ketika angin bertiup, baling-baling berputar, memutar rotor yang terhubung ke *gearbox* untuk meningkatkan kecepatan putaran. Energi mekanik dari rotor kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Gambar 4.5 untuk gambaran cara kerja turbin angin:



**Gambar 4. 5** Cara Kerja Turbin Angin  
(Sumber :*How Stuff Works*, 2006)

*Gearbox* menggunakan serangkaian roda gigi untuk mentransfer dan mempercepat putaran dari rotor ke generator. Prinsip kerja *gearbox* adalah untuk

mengubah kecepatan dan torsi dari sumber tenaga, seperti rotor turbin angin, menjadi kecepatan yang lebih tinggi agar sesuai dengan kebutuhan generator. Dalam PLTB, rotor berputar dengan kecepatan yang relatif lambat, dan *gearbox* meningkatkan putaran ini hingga ribuan rpm, memungkinkan generator menghasilkan listrik. Setelah listrik dihasilkan, inverter akan mengubah arus searah (DC) dari generator menjadi arus bolak-balik (AC) yang bisa digunakan oleh jaringan listrik.

Indonesia belum memiliki data harga untuk PLTB, oleh karena itu untuk menentukan data dari IEA tentang LCOE turbin angin dengan model lepas pantai atau *offshore*. Hal ini dikarenakan PLTB dengan model lepas pantai akan menghasilkan listrik yang lebih banyak dan stabil dibanding dengan PLTB di daratan atau *onshore*. Tabel 4.2 menjelaskan LCOE *offshore* beberapa negara yang sudah menggunakannya.

**Tabel 4. 2** *Levelized Cost Of Electricity* PLTB

| Negara          | Biaya LCOE (USD/MWh) | Biaya LCOE (USD/kWh) |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| Amerika Serikat | 40,51                | 0,0405               |
| Prancis         | 66,81                | 0,0668               |
| China           | 62,66                | 0,0627               |
| Jepang          | 131,88               | 0,131                |
| Denmark         | 32,49                | 0,0325               |
| Belgia          | 59,3                 | 0,0593               |
| Rata - rata     | 58,3383              | 0,0583               |

(Sumber : IEA, 2020)

Berdasarkan tabel 4.2 dapat disimpulkan bahwa harga yang dijual oleh PLTB, jika melihat negara yang sudah menggunakannya, rata – rata nya adalah 0,0656 USD/kWh atau 1.023 Rp/kWh pada tahun 2022

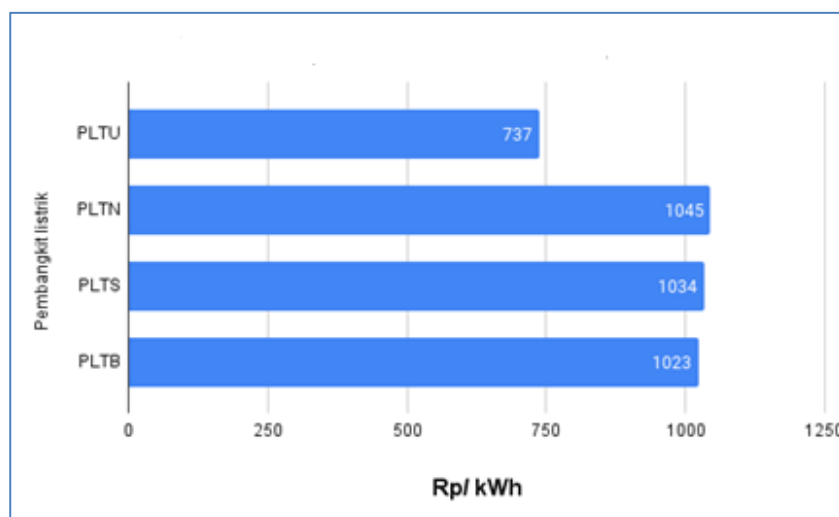
#### 4.2.5 Perbandingan Harga Pembangkit Listrik

Dalam mempertimbangkan sumber energi yang paling efisien, penting untuk melihat biaya produksi listrik per kilowatt-jam (Rp/kWh). Setiap jenis pembangkit memiliki biaya produksi yang berbeda-beda, bergantung pada investasi awal, biaya operasional, bahan bakar, dan umur ekonomisnya. Pada tabel 4.3 diketahui harga dari masing masing jenis pembangkit listrik

**Tabel 4. 3** Perbandingan Harga Pembangkit Listrik 2022

| Pembangkit listrik | Harga pada tahun 2022<br>( Rp/ kWh) |
|--------------------|-------------------------------------|
| PLTU               | 737                                 |
| PLTN               | 1.045                               |
| PLTS               | 1.034                               |
| PLTB               | 1.023                               |

Untuk mempermudah visualisasi tabel 4.3, disajikan dalam bentuk grafik horizontal pada gambar 4.6.



**Gambar 4. 6** Perbandingan Harga Pembangkit Listrik

Untuk lebih menjelaskan perbedaan antara jenis pembangkit listrik, berikut adalah contoh perbandingan harga yang harus dibayarkan. Menurut Kementerian ESDM konsumsi listrik per kapita Indonesia pada 2022 mencapai 1.173 kWh/kapita. Konsumsi listrik per kapita adalah total jumlah energi listrik yang digunakan di suatu wilayah, dibagi dengan jumlah penduduknya dalam periode satu tahun. Tabel 4.4 menunjukkan rata-rata konsumsi listrik tiap penduduk. Dengan data tersebut kita dapat menghitung perbandingan biaya.

**Tabel 4. 4** Perbanding Harga Pembangkit Listrik per Kapita 2022

| Pembangkit listrik | Harga pada tahun 2022 ( Rp/ kWh) | Listrik yang terjual tahun 2022 per kapita (kWh) | Harga (Rupiah) |
|--------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|
| PLTU               | 737                              | 1.173                                            | 864.501        |
| PLTN               | 1.045                            |                                                  | 1.225.785      |
| PLTS               | 1.034                            |                                                  | 1.212.882      |
| PLTB               | 1.023                            |                                                  | 1.199.979      |

Untuk mempermudah visualisasi tabel 4.4, disajikan dalam bentuk grafik horizontal pada gambar 4.7.



**Gambar 4. 7** Perbanding Harga Pembangkit Listrik per Kapita 2022

Berdasarkan laporan IPCC, perpindahan dari pembangkit listrik berbasis uap batubara ke nuklir dan energi baru terbarukan memiliki dampak ekonomi yang kompleks. Peralihan ini dapat mengurangi biaya eksternal yang terkait dengan emisi karbon dan polusi udara, sehingga memberikan manfaat ekonomi dalam jangka panjang melalui peningkatan kesehatan masyarakat dan mitigasi perubahan iklim. Namun, biaya awal investasi teknologi nuklir dan energi baru terbarukan yang tinggi dapat menjadi tantangan, terutama bagi negara berkembang. Harga produksi energi yang lebih mahal dibandingkan dengan uap batubara dapat menyebabkan kenaikan harga listrik secara menyeluruh karena dampaknya pada rantai pasok barang dan jasa, terutama dalam jangka pendek. Biaya produksi yang meningkat ini dapat memengaruhi harga produk di berbagai sektor, menekan daya beli masyarakat, dan menimbulkan tantangan ekonomi dalam masa transisi.

Selain itu, pergeseran ini berpotensi menciptakan dampak sosial-ekonomi berupa pengurangan lapangan kerja di sektor batubara, tetapi dapat diimbangi oleh pertumbuhan pekerjaan baru di sektor energi bersih. Dalam jangka panjang, diversifikasi energi melalui nuklir dan energi baru terbarukan dapat meningkatkan ketahanan energi, stabilitas harga, serta menciptakan kondisi sosial yang lebih sehat dengan pengurangan penyakit akibat polusi udara.

### **4.3 Analisis Perbandingan dampak lingkungan**

Fungsi utama pembangkit listrik adalah menghasilkan energi, tetapi dampaknya terhadap lingkungan berbeda. Dengan melakukan perbandingan dampak lingkungan kita dapat memahami lebih lanjut mengenai dampak yang akan sudah dihasilkan dari kegiatan pembangkit listrik berdasarkan jenisnya. Emisi karbon dan pengelolaan limbah adalah dua faktor penting dalam menilai dampak lingkungan pembangkit listrik.

#### **4.3.1 Emisi karbon**

Dalam penelitian ini emisi karbon yang dihasilkan berpacu pada standar

dari *the United Nations (UN) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Energi yang terjual oleh PLN pada tahun 2022 adalah 273.762 GWh, untuk pulau Jawa terjual sebesar 188.948 Gwh. Untuk menghitung emisi karbon digunakan satuan g CO<sub>2</sub>-eq/Kwh atau bisa setara dengan tonCO<sub>2</sub>eq/Gwh. Dengan menggunakan median value dari IPCC kita mengetahui berapa emisi karbon yang di lepas oleh dan jika menggunakan pembangkit listrik tertentu.

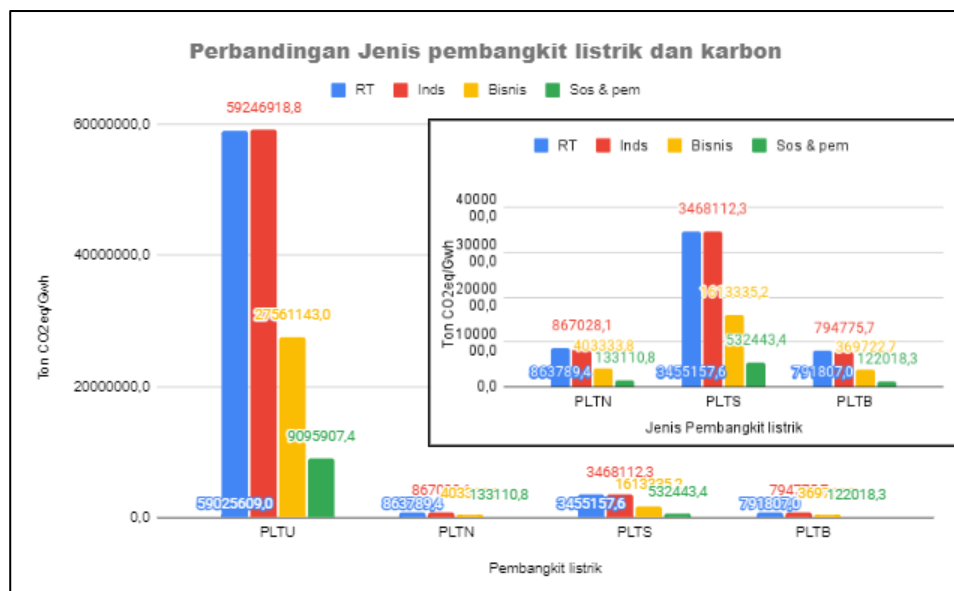
Emisi karbon dioksida ekuivalen (CO<sub>2</sub>eq) merupakan salah satu indikator penting dalam menilai dampak lingkungan dari berbagai sumber energi. Menurut laporan IPCC, PLTU yang menggunakan batu bara menghasilkan emisi median sebesar 820 gram CO<sub>2</sub>eq per kilowatt-jam (g/kWh). Angka ini mencakup emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara serta dampak lingkungan dari penambangan batu bara itu sendiri. Sementara itu, PLTN memiliki emisi yang jauh lebih rendah, yaitu hanya 12 g/kWh, yang berasal dari penggalian uranium. Dalam hal energi terbarukan, PLTS menghasilkan emisi sekitar 48 g/kWh, yang terkait dengan penambangan bahan-bahan yang diperlukan untuk merakit sel surya. PLTB, di sisi lain, menunjukkan emisi yang paling rendah, yaitu 11 g/kWh. Angka ini mencerminkan emisi yang berasal dari kegiatan penambangan bahan-bahan yang diperlukan untuk membangun turbin angin serta proses merakit unit-unit turbin tersebut.

Setelah mengetahui angka media kita bisa memberikan contoh perbandingan dengan menggunakan data PLN tahun 2022 dengan menggunakan energy yang terjual berdasarkan sektor rumah tangga, industri, bisnis dan kegiatan pemerintahan dan sosial. Dengan menggunakan persamaan 1 g/kwh = 1 ton/gwh, Tabel 4.5 melihatkan perbedaan karbon berdasarkan jenis pembangkit listrik yang dihasilkan pulau Jawa pada tahun 2022 :

**Tabel 4. 5 Perbandingan Emisi Karbon CO<sub>2</sub>-eq**

| Jenis Pelanggan         | Listrik terjual(Gwh) | PLTU                                            | PLTN        | PLTS        | PLTB        |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                         |                      | Karbon per listrik (Ton CO <sub>2</sub> eq/Gwh) |             |             |             |
|                         |                      | 820                                             | 12          | 48          | 11          |
| Rumah Tangga            | 71.982,5             | 59.025.609,0                                    | 863.789,4   | 3.455.157,6 | 791.807,0   |
| Industri                | 72.252,3             | 59.246.918,8                                    | 867.028,1   | 3.468.112,3 | 794.775,7   |
| Bisnis                  | 33.611,2             | 27.561.143,0                                    | 403.333,8   | 1.613.335,2 | 369.722,7   |
| Sosial dan pemerintahan | 11.092,6             | 9.095.907,4                                     | 133.110,8   | 532.443,4   | 122.018,3   |
| Total                   | 188.938,5            | 154.929.578,2                                   | 2.267.262,1 | 9.069.048,5 | 2.078.323,6 |

Untuk mempermudah visualisasi tabel 4.5, disajikan dalam bentuk grafik vertikal pada gambar 4.8



**Gambar 4. 8 Perbandingan Emisi Karbon CO<sub>2</sub>-eq**

Berdasarkan gambar 4.8 diketahui bahwa PLTU menghasilkan karbon terbesar dalam skenario diatas sekitar 154 juta ton CO<sub>2</sub>eq, 68 kali lebih banyak dibanding PLTN sekitar 2,267 juta ton CO<sub>2</sub>eq, 17 kali dibanding PLTS sekitar 9 juta ton CO<sub>2</sub>eq, dan 74 kali dibandingkan PLTB sekitar 2 juta ton CO<sub>2</sub>eq. Hal ini menunjukkan perbandingan emisi yang dihasilkan oleh batubara dan prosesnya berdampak sangat besar dibanding jenis pembangkit lainnya.

Pembuangan karbon dalam skala besar ini memiliki dampak yang mendalam pada siklus karbon dan dapat mengganggu keseimbangan ekologis. Dalam siklus karbon, karbon dioksida diserap oleh tumbuhan melalui fotosintesis dan dilepaskan kembali ke atmosfer melalui proses respirasi, pembusukan, dan pembakaran bahan bakar fosil. Ketika emisi CO<sub>2</sub> melebihi kapasitas ekosistem untuk menyerapnya, terjadilah akumulasi karbon di atmosfer, yang mempercepat pemanasan global dan mengganggu pola cuaca. Akibatnya, kita menghadapi risiko perubahan iklim yang ekstrem, yang mengancam ekosistem dan keberlangsungan hidup manusia

Lebih lanjut, emisi karbon berlebih dapat menghadapi risiko perubahan iklim ekstrem yang memiliki dampak serius terhadap ekosistem dan keberlangsungan hidup manusia. Misalnya, peningkatan suhu global dapat menyebabkan pencairan es di Kutub Utara, mengakibatkan kenaikan permukaan laut yang mengancam kota-kota pesisir seperti Jakarta dan Miami. Perubahan pola cuaca juga dapat meningkatkan frekuensi dan intensitas badai, menyebabkan kerusakan infrastruktur dan hilangnya tempat tinggal. Dampak lain dari perubahan iklim dapat memicu kekeringan yang lebih parah, mengancam ketahanan pangan di wilayah yang bergantung pada sektor pertanian, perkebunan dan agrikultur, dampak ini langsung berkontribusi pada dampak ekonomi dan sosial negara yang tertimpa. Ekosistem laut, terutama terumbu karang, terancam oleh pemanasan air dan pengasaman, yang dapat mengakibatkan punahnya spesies laut dan mengganggu mata pencaharian nelayan. Selanjutnya, perubahan suhu dan curah hujan dapat mempengaruhi kesehatan manusia, dengan meningkatkan penyebaran penyakit yang ditularkan oleh vektor seperti malaria dan demam

berdarah. Perubahan suhu yang panas dan agresifitas matahari yang meningkat membuat peluang kanker kulit lebih tinggi. Semua ini dan masih banyak lagi menunjukkan betapa seriusnya konsekuensi dari perubahan iklim yang ekstrem, yang dapat merusak kehidupan dan kesejahteraan di seluruh dunia.

#### **4.3.2 Dampak limbah**

Dalam perbandingan limbah dari berbagai jenis pembangkit listrik, PLTN menonjol dengan kompleksitas pengelolaan dan risiko lingkungan tertinggi. Limbah radioaktif yang dihasilkan memerlukan penyimpanan khusus yang aman untuk jangka waktu yang sangat lama, karena berpotensi mencemari lingkungan secara luas dan dalam waktu yang lama jika terjadi kebocoran. PLTU, meskipun lebih mudah dikelola, tetap menimbulkan risiko terhadap lingkungan, terutama karena potensi pencemaran logam berat dari fly ash dan bottom ash serta dampak negatif pada ekosistem air akibat pembuangan air panas.

Selain emisi gas karbon, PLTU juga menghasilkan berbagai limbah padat dan cair yang dapat menimbulkan dampak lingkungan signifikan. Salah satu limbah utama adalah abu batu bara, yang terbentuk dari pembakaran batu bara dan dapat mengandung logam berat berbahaya seperti merkuri, timbal, dan arsenik. Abu ini biasanya dibagi menjadi dua jenis: abu terbang yang dihasilkan selama proses pembakaran dan abu dasar yang tertinggal di bagian bawah tungku. Selain itu, limbah cair berasal dari proses pengolahan air pendingin dan sistem pengendalian polusi, yang dapat terkontaminasi bahan kimia berbahaya. Limbah ini, jika tidak dikelola dengan baik, berpotensi mencemari sumber air dan tanah, serta membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem. Untuk mengurangi dampak ini, penting untuk menerapkan teknologi pengendalian emisi, mendaur ulang abu, dan teknologi sistem pengolahan air limbah.

Limbah yang dihasilkan PLTN terutama berasal dari proses reaksi fisi nuklir yang terjadi di dalam reaktor. Dalam proses ini, bahan bakar nuklir seperti uranium-235 atau plutonium-239 dipecah untuk menghasilkan energi. Selama reaksi ini, sejumlah produk sampingan radioaktif terbentuk, termasuk isotop radioaktif seperti cesium-137 dan strontium-90, yang dapat tetap berbahaya

selama ribuan tahun. Limbah ini muncul dalam beberapa bentuk, termasuk limbah padat, cair, dan gas. Limbah padat biasanya berupa batang bahan bakar yang telah habis pakai, sedangkan limbah cair dapat berasal dari proses pendinginan dan pengolahan air yang terkontaminasi. Gas radioaktif juga dapat dilepaskan dari reaktor selama pengoperasian, meskipun biasanya dalam jumlah yang sangat kecil. Pada gambar 4.9 adalah salah satu contoh simulasi pengolahan limbah radioaktif:



**Gambar 4. 9** Contoh Penanganan Limbah PLTN

(Sumber : *World Nuclear Association*, 2022)

Menurut Meilsari (2019), teknologi pengolahan limbah radioaktif mencakup beberapa metode yang disesuaikan dengan bentuk limbahnya. Limbah radioaktif cair diolah melalui evaporasi, sorpsi, pertukaran ion, serta pengolahan kimia seperti koagulasi dan flokulasi, dengan residunya kemudian disolidifikasi untuk mencegah penyebaran ke lingkungan. Limbah radioaktif padat diproses menggunakan insenerasi, kompaksi, dan imobilisasi, sementara limbah radioaktif gas diolah melalui filtrasi, dengan abu sisa pembakaran yang diimobilisasi. Untuk limbah radioaktif tingkat tinggi yang mengandung aktinida minor (MA), pengolahan dilakukan melalui sistem transmudasi menggunakan *Accelerator-Driven System* (ADS).

Penanganan limbah PLTN memerlukan perhatian yang sangat serius karena potensi dampak negatif yang ditimbulkannya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Limbah radioaktif harus disimpan dalam wadah khusus yang dirancang untuk mencegah kebocoran dan memastikan isolasi dari lingkungan sekitar. Metode penyimpanan jangka panjang, seperti penempatan di fasilitas penyimpanan geologis yang dalam dan stabil, menjadi penting untuk mengisolasi limbah sampai tingkat radioaktivitasnya menurun hingga aman. Selain itu, pengawasan ketat dan pemantauan berkala diperlukan untuk menghindari kebocoran atau kontaminasi yang dapat terjadi selama proses penyimpanan. Pendekatan ini bertujuan untuk melindungi generasi mendatang dan menjaga kelestarian lingkungan dari dampak berbahaya limbah radioaktif.

Limbah PLTS umumnya terkait dengan panel surya yang telah mencapai akhir masa pakai mereka, biasanya setelah 25 hingga 30 tahun. Panel surya terdiri dari berbagai material, termasuk silikon, logam berat seperti cadmium dan timbal, serta bahan kimia berbahaya lainnya yang dapat berpotensi mencemari lingkungan jika tidak ditangani dengan baik, panel surya sendiri termasuk dalam kategori sampah elektronik atau *e-waste*. Ketika panel surya menjadi tidak dapat digunakan lagi, mereka dapat menghasilkan limbah padat yang perlu dikelola untuk mencegah dampak negatif terhadap ekosistem. Selain itu, proses produksi panel surya itu sendiri dapat menghasilkan limbah yang berupa bahan sisa, termasuk limbah kimia dari pembuatan sel surya.

Pengelolaan *e-waste* dari panel surya melibatkan proses sistematis untuk menangani limbah yang dihasilkan ketika panel mencapai akhir masa pakainya. Langkah pertama adalah pengumpulan panel surya usang, yang biasanya dilakukan melalui program pengembalian atau fasilitas daur ulang khusus. Setelah terkumpul, panel tersebut akan dipisahkan untuk mengidentifikasi komponen yang dapat didaur ulang, seperti silikon, logam, dan kaca. Proses ini melibatkan pemecahan panel dan pemisahan material berbahaya, seperti logam berat dan bahan kimia, untuk memastikan mereka tidak mencemari lingkungan. Setelah pemisahan, material yang dapat didaur ulang akan diproses dan diolah kembali menjadi bahan mentah yang dapat digunakan dalam produksi baru. Dengan

demikian, pengelolaan *e-waste* dari panel surya tidak hanya mencegah pencemaran tetapi juga mendukung keberlanjutan dengan mengurangi kebutuhan akan sumber daya baru

Limbah PLTB umumnya berasal dari komponen turbin angin, yang dapat mengalami kerusakan seiring waktu dan memerlukan penggantian. Ketika turbin tidak lagi berfungsi, bagian-bagian seperti bilah rotor, *gearbox*, dan komponen listrik dapat menjadi limbah yang perlu dikelola. Bilah rotor yang terbuat dari fiberglass dan komposit lainnya sulit untuk didaur ulang, sehingga jika tidak dikelola dengan baik, dapat berkontribusi pada masalah limbah padat. Selain itu, selama masa operasional, PLTB juga menghasilkan limbah kecil seperti minyak pelumas dan bahan kimia yang digunakan dalam pemeliharaan turbin. Penanganan limbah ini penting untuk mencegah pencemaran tanah dan air. Oleh karena itu, pengelolaan limbah dari PLTB harus mencakup program pemeliharaan yang baik untuk memperpanjang umur turbin serta strategi daur ulang dan pengelolaan limbah yang efektif.

Berdasarkan penjelasan diatas, Tabel 4.6 mempermudah pemahaman dan melakukan perbandingan dilakukan dalam bentuk poin. Perbandingan dilakukan dalam bentuk kompleksitas dalam mengelola limbah dan resiko lingkungannya.

**Tabel 4. 6 Analisis Pengolahan Limbah**

| Jenis Pembangkit Listrik |      | Kompleksitas Pengelolaan | Risiko Lingkungan                                                                                                                                        |
|--------------------------|------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PLTN                     |      | Sangat tinggi            | Sangat tinggi (limbah radioaktif memerlukan penyimpanan jangka panjang dan berisiko mencemari lingkungan secara luas dan lama).                          |
| PLTU                     |      | Menengah                 | Tinggi (pencemaran logam berat dari fly ash dan bottom ash, serta potensi kerusakan ekosistem air dari limbah air panas).                                |
| EBT                      | PLTS | Menengah                 | Rendah hingga menengah (limbah elektronik memerlukan daur ulang khusus, tetapi dampaknya lebih terbatas dan dapat dikelola dengan teknologi yang tepat). |
|                          | PLTB | Rendah hingga menengah   | Rendah (limbah komposit sulit didaur ulang tetapi tidak beracun; limbah elektronik dan pelumas memiliki dampak lingkungan yang minim)                    |

#### 4.4 Analisis Perbandingan Keandalan

Keandalan pembangkit listrik bergantung pada ketersediaan sumber energi. Pembangkit berbahan bakar fosil dan nuklir umumnya lebih andal karena tidak bergantung pada cuaca, sedangkan energi terbarukan seperti surya dan angin lebih fluktuatif, karena dipengaruhi kondisi alam. Teknologi penyimpanan energi dapat membantu meningkatkan keandalan pembangkit terbarukan.

Keandalan pembangkit listrik berdampak langsung pada harga, ketersediaan listrik, dan keamanan energi. Pembangkit yang lebih andal cenderung memiliki biaya operasi lebih stabil, sehingga harga listrik lebih konsisten. Ketidakandalan, terutama pada pembangkit terbarukan yang bergantung pada cuaca, bisa menyebabkan fluktuasi pasokan listrik, yang mempengaruhi harga dan ketersediaan. Selain itu, keandalan rendah dapat mengancam keamanan energi, menyebabkan pemadaman yang berdampak pada infrastruktur penting serta kestabilan ekonomi. Untuk memahami lebih lanjut tabel 4.7 pembahasan menggunakan bentuk tabel.

**Tabel 4. 7** Perbandingan Keandalan listrik

| Jenis Pembangkit |      | Keandalan                      | Faktor Utama                                                                     | Kebutuhan Tambahan                        |
|------------------|------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| PLTU             |      | Tinggi<br>(PLN, 2022)          | Tidak tergantung cuaca, Listrik stabil                                           | Pasokan batubara yang stabil              |
| PLTN             |      | Sangat tinggi<br>(Brook, 2014) | Tidak tergantung cuaca, Listrik Stabil, Kapasitas sangat besar                   | Pengelolaan uranium dan limbah radioaktif |
| EBT              | PLTS | Rendah<br>(Faizin, 2018)       | Bergantung pada sinar matahari, Hanya beroperasi selama 12 jam.                  | Teknologi penyimpanan energi              |
|                  | PLTB | Rendah<br>(ESDM, 2020)         | Bergantung pada kecepatan angin, Letak lokasi kincir angin, ukuran kincir angin, | Teknologi penyimpanan energi              |

#### 4.5 Analisis Skoring MCDA

Analisis Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) membantu menilai berbagai opsi pembangkit listrik dengan mempertimbangkan beberapa faktor seperti harga, dampak lingkungan, dan keandalan. Dalam hal ini, bobot yang digunakan adalah 40% untuk harga, 40% untuk dampak lingkungan, dan 20% untuk keandalan. Tabel 4.8 menunjukkan hasil analisis untuk PLTU, PLTN, EBT. Dengan menggunakan bobot ini, kita dapat melihat bagaimana setiap jenis pembangkit listrik dibandingkan, memungkinkan penilaian yang lebih seimbang terhadap kinerja masing-masing opsi berdasarkan prioritas yang ditentukan.

**Tabel 4. 8** Analisi MCDA

| Kriteria          | Bobot (%) | PLTU | Skor PLTU | PLTN | Skor PLTN | EBT  | Skor EBT |
|-------------------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|----------|
| Harga             | 40        | 9    | 3,6       | 6    | 2,4       | 6    | 2,4      |
| Dampak Lingkungan | 40        | 3    | 1,2       | 7    | 2,8       | 9    | 3,6      |
| Keandalan         | 20        | 9    | 1,8       | 10   | 2         | 4    | 0,8      |
| Total             | 100       | 21,0 | 6,6       | 23,0 | 7,2       | 19,0 | 6,8      |

Berdasarkan tabel diatas, PLTN memiliki bobot paling tinggi yaitu 7,2 diikuti oleh EBT yaitu analisis gabungan PLTS dan PLTB sebesar 6,8 dan PLTU dengan bobot terendah yaitu 6,6. Dari tabel dan analisa yang sudah dilakukan kita dapat menentukan kelebihan dan kekurangan dari masing masing pembangkit listrik, berikut dalam bentuk poin :

1. PLTU : Memiliki harga yang paling murah jika dibandingkan dengan yang lain, memiliki keandalan energi yang stabil akan tetapi memiliki dampak lingkungan yang sangat tinggi dengan emisi karbon yang sangat tinggi.
2. PLTN : Memiliki keandalan yang paling tinggi dikarenakan energy yang dihasilkan sengan besar, memiliki emisi karbon yang sangat rendah tetapi

memiliki pengolahan limbah yang sangat kompleks dikarenakan menghasilkan limbah radioaktif. Kelemahan adalah harga yang cukup tinggi dikarenakan kompleksitas operasional nuklir.

3. EBT : Memiliki dampak lingkungan paling kecil karena sangat sedikit mengeluarkan emisi karbon, dan pengelolaan limbah *e-waste* yang cukup kompleks. Keandalan adalah kelemahan utama EBT baik PLTS dan PLTB karena sangat mengandalkan cuaca dan penetapan lokasi untuk menghasilkan energi. Untuk harga memiliki harga yang cukup tinggi dikarenakan keperluan alat dan teknologi untuk mengolah cahaya matahari dan angin menjadi listrik.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN & SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan antara lain sebagai berikut :

1. Berdasarkan penelitian dan perbandingan menggunakan metode *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), dan Energi Baru Terbarukan (EBT) memiliki kelebihan dan kekurangan yang bervariasi. PLTU unggul dengan biaya paling rendah dan keandalan listrik yang stabil, namun memiliki dampak lingkungan tinggi akibat emisi karbon yang signifikan. PLTN menawarkan keandalan listrik tertinggi dengan output besar dan emisi karbon rendah, tetapi biayanya lebih tinggi dibandingkan PLTU, serta pengelolaan limbahnya menghadirkan tantangan besar dan potensi bahaya lingkungan. EBT, yang diwakili oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Bayu (PLTB), memiliki dampak lingkungan terendah dengan emisi dan limbah yang tidak berbahaya, namun keandalan listriknya kurang stabil karena bergantung pada cuaca dan lokasi, sementara biayanya setara dengan PLTN.
2. PLTU memiliki LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) atau harga jual yang rendah, yaitu Rp737/kWh, namun menghasilkan emisi karbon tinggi, sekitar 154.929.578 ton CO<sub>2</sub>-eq/gWh per tahun (68 kali lebih besar dari PLTN, 17 kali lebih besar dibanding PLTS dan 68 kali lebih besar dibanding PLTB) yang berdampak buruk pada lingkungan dan kesehatan. Dampak dari emisi karbon berlebih ini termasuk perubahan iklim, polusi udara, serta peningkatan risiko penyakit pernapasan dan jantung pada masyarakat. Sementara itu,

PLTN memiliki LCOE lebih tinggi, sekitar Rp1.045/kWh, dengan emisi karbon rendah, yaitu 2.267.262 ton CO<sub>2</sub> -eq/gWh per tahun, namun menghasilkan limbah radioaktif yang memerlukan perhatian khusus. Limbah ini berbahaya dan memerlukan pengelolaan jangka panjang serta penyimpanan yang aman untuk mencegah kontaminasi lingkungan. EBT yaitu PLTB dan PLTS secara urut memiliki LCOE sekitar Rp1.023 dan Rp1.034/kWh dan emisi karbon rendah, yaitu 2.078.323 dan 9.069.048 ton CO<sub>2</sub> -eq/gWh per tahun, yang lebih ramah lingkungan tanpa masalah limbah yang berbahaya. Meskipun harga energi dari PLTN dan EBT lebih tinggi, harga tersebut akan stabil kembali dalam jangka panjang, dengan dampak positif pada kesehatan dan ekonomi melalui pengurangan polusi, peningkatan kualitas hidup, serta membuka lapangan kerja baru di sektor energi hijau dan pengelolaan teknologi, yang memberikan manfaat ekonomi lokal yang berkelanjutan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, peneliti mempunyai beberapa masukan terkait dengan penelitian yang telah dilakukan antara lain sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode MCDA, disarankan agar Pulau Jawa mulai beralih menuju energi yang lebih hijau dengan menjadikan PLTN sebagai sumber energi utama. PLTN memiliki emisi karbon yang sangat rendah, meskipun memerlukan perhatian khusus terhadap pengelolaan limbah radioaktif. Sebagai pelengkap, EBT seperti PLTS dan PLTB dapat dimanfaatkan untuk mendukung kebutuhan energi, karena keduanya memiliki dampak lingkungan yang minimal. Transisi ini akan mengurangi ketergantungan terhadap PLTU yang memiliki emisi karbon tinggi, serta membawa manfaat jangka panjang berupa pengurangan polusi, peningkatan kesehatan masyarakat, dan penciptaan lapangan kerja baru di sektor energi terbarukan. Dengan langkah ini,

Pulau Jawa dapat mewujudkan keberlanjutan energi yang lebih ramah lingkungan dan mendukung pertumbuhan ekonomi yang positif

2. Kepada pemerintah untuk mulai serius untuk mempertimbangkan opsi pembangkit listrik yang lebih ramah lingkungan dan membuat regulasi ketat tentang emisi karbon mengingat dampak emisi karbon akan lebih terasa tiap tahunnya. Penelitian ini memuat perbandingan sederhana dan sebagai masukan akan dampak lingkungan dan opsi yang dibandingkan
3. Kepada kampus dan jajarannya untuk lebih mengedukasi dampak emisi karbon, perubahan iklim dan opsi energi yang lebih ramah lingkungan seperti manfaat nuklir. Dengan mempelajari nuklir baik manfaat dan resikonya akan membuat pemikiran, stigma serta bias terhadap nuklir dan energi terbarukan lainnya lebih terbuka dan membuka jalan untuk penelitian yang lebih dalam guna mencari solusi dari salah satu dampak lingkungan dengan skala global ini.
4. Kepada peneliti dengan topik yang kajian serupa untuk selanjutnya, mempelajari lebih dalam, menggunakan metode yang lebih kompleks, sumber yang lebih baik dan relevan dan yang terpenting adalah Utamakan penggunaan data primer dalam mengevaluasi opsi energi agar dapat memperoleh informasi yang akurat dan relevan sesuai konteks lokal. Data primer, seperti survei langsung, wawancara dengan ahli, atau pengamatan lapangan, membantu mengurangi bias yang sering muncul saat menggunakan data sekunder yang mungkin tidak sepenuhnya relevan atau terpengaruh oleh kondisi eksternal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adrianti, A. (2016). *Evaluasi Keandalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang Terhubung ke Grid*. Jurnal Nasional Teknik Elektro, 5(2), 230–236.
- Alijoyo, A., Wijaya, B., & Jacob, I (2021). *Multi-criteria Decision Analysis Analisis Keputusan Multikriteria*. CRMS: Bandung.
- Badan Pusat Statistik. (2020). *Statistik Indonesia 2020*. Badan Pusat Statistik Republik Indonesia: Jakarta.
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2023*. Badan Pusat Statistik Republik Indonesia: Jakarta.
- Baskoro, F. R., Takahashi, K., Morikawa, K., & Nagasawa, K.. (2022). *Multi-objective optimization on total cost and carbon dioxide emission of coal supply for coal-fired power plants in Indonesia*. Elsevier B.V: Amsterdam.
- Brook, B. W., Alonso, Meneley, DA, Misak, J., Blees, T., & van Erp, JB (2014). *Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix*. Sustainable Materials and Technologies. Elsevier B.V: Amsterdam.
- Edwaren Liun dan Sunardi. (2014). *Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan dan Fosil*. BATAN: Jakarta.
- Faizin, M. A., Arnandi, W., dan Setyo, A. N. (2018). *Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Unjuk Kerja Solar Cell Tipe Polycrystalline Silicon Kapasitas 10 Watt*. RIDTEM: Riset Diploma Teknik Mesin, 1(2), 27-35.
- Grow Safety Institute. (2023.). *Boiler tenaga nuklir menghasilkan energi bersih dan kuat*. Diakses dari <https://growsafetyinstitute.co.id/boiler-tenaga-nuklir-menghasilkan-energi-bersih-dan-kuat/>
- Hester, R. E., & Harrison, R. M. (Eds.). (2017). *Carbon Capture and Storage: Theoretical Knowledge and Experiments*. Royal Society of Chemistry.
- Holechek, J. L., Geli, H. M., Sawalhah, M. N., & Valdez, R. (2022). *A global assessment: can renewable energy replace fossil fuels by 2050?* Sustainability, 14(8), 4792.

- How Stuff Works. (2006). *Cara kerja tenaga angin*. Diakses dari <https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power.htm>
- International Energy Agency. (2020). *World Energy Outlook 2020*. OECD/IEA: Paris.
- International Energy Agency & Nuclear Energy Agency. (2020). *Projected Costs of Generating Electricity*. IEA/NEA: Paris.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: New York.
- IPCC. (2014). *Annex III: Technology-specific cost and performance parameters*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2018). *Summary for Policymakers*. In: *Global Warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Kementerian Energi dan Daya Sumber Mineral. (2021). *Potensi Energi Angin Indonesia 2020*. Jenderal Energi Terbarukan dan Konservasi Energi: Jakarta.
- Kementerian Energi dan Daya Sumber Mineral. (2023). *Statistik Ketenagalistrikan 2022*. Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan: Jakarta.
- Kementerian Kesehatan RI. (2024). *Dampak perubahan iklim terhadap kesehatan*, Kementerian Kesehatan RI : Klaten.
- Kementerian Keuangan Republik Indonesia, Direktorat Jenderal Perbendaharaan Provinsi Sulawesi Tenggara. (2024). *Pengaruh perubahan iklim terhadap kinerja sektor perekonomian regional: Identifikasi sektor terdampak*. Sekretariat Kementerian Keuangan. Kendari.
- Kementerian Pendidikan dan Budaya. (2015). *Teknologi PLTB*. Sekretariat Direktorat Jenderal Guru dan Tenaga Kependidikan: Jakarta.

- Kementerian Pertahanan. (2024). *Energi Baru dan Terbarukan “EBT” Sebagai Teknologi Alternatif di Masa Depan dalam Mendukung Pertahanan Negara*. Jakarta.
- Kristyadi, Tarsius. (2020). *Lignite Coal Fired Power Plant*. Penerbit Itenas: Bandung.
- Kumara, Ketut Vidhia . (2018). Tinjauan terhadap PLTS 24 KW Atap Gedung PT Indonesia Power Pesanggaran Bali. E-Journal SPEKTRUM Vol 5 No 2.
- Kusumawardhani, I. D., & Gernowo, R. (2015). *Analisis perubahan iklim berbagai variabilitas curah hujan dan emisi gas metana (CH<sub>4</sub>) dengan metode Grid Analysis and Display System (GrADS) di Kabupaten Semarang*. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro: Semarang.
- Lapenangga, Apridus K. (2016). *Carbon Footprint Analysis of a T-45 House in Kupang*. DIMENSI, Jurnal Teknik Arsitektur, 43(2), 77-84.
- Leung, D. Y., & Caramanna, G. (2019). *Advances in renewable energy technologies: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113, 109-132.
- Liu, J., & Jamasb, T. (2018). *Cleaner energy for China: A comparative assessment of the role of renewables in meeting China's future energy needs*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 1350-1361.
- Munawaroh, N., Syamsyiatun, S., & Fikri, A. A. (2019). *Sistem Pengolahan Air dan Pengendalian Limbah di PLTU Tanjung Jati-B Desa Tubanan Kembang Jepara*. Jurnal Bakti Saintek: Jurnal Pengabdian Masyarakat Bidang Sains dan Teknologi, 3(2), 73-76. <https://doi.org/10.14421/jbs.1406>.
- Nazir, Mohammad. (1988). *Metode Penelitian*. Ghalia Indonesia: Jakarta.
- Parera, L. Tupalessy J., Kasnaja R. 2019. Pengembangan Listrik Tenaga Surya bagi Pedagang Kuliner. Carrade jurnal pengabdian masyarakat. [https://www.researchgate.net/figure/fig1\\_333818166](https://www.researchgate.net/figure/fig1_333818166)
- Perusahaan Listrik Negara. (2022). *Statistik PLN 2022*. PT PLN (Persero): Jakarta.

- Putri, N. M. K., Bambang, J. S., & Aritonang, S. (2022). *Uranium and Thorium Potential for Indonesia's Future Energy Security*. International Journal of Education and Social Science Research, 5(1), 235-251.
- Rizki Firmansyah Setya Budi dan Suparman. (2013). *Perhitungan Faktor Emisi CO<sub>2</sub> PLTU Batubara dan PLTN*. BATAN: Jakarta.
- Susianti, H., Sriyana, S., Bahari, M. S., Fepriadi, F., Birmano, M. D., Priambodo, D., Anggoro, Y. D., Suparman, S., Lesmana, A. C., & Aryanto, A (2023). *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia: Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission*. Unisma Press: Malang.
- Syahputra, Ramadoni. (2020). *Teknologi pembangkit tenaga listrik* (Diktat). Universitas Muhammadiyah Yogyakarta : Yogyakarta.
- Syaeful, H., Sukadana, I. G., Susilo, Y. S. B., Indrastomo, F. D., & Muhammad, A. G. (2021). *Uranium exploration, deposit and resources: The key of nuclear power plant development program in Indonesia*. Journal of Physics: Conference Series, 2048, 012003.
- Tanwir, Widiastuti, & Fabanyo, A. M. (2019). *Penyerapan Energi Matahari pada Solar Cell dengan Menggunakan Sistem Tracking*. Jurnal Teknik Mesin, 1(2), 13-25.
- U.S. Geological Survey. (2018). *A coal-fired thermoelectric power plant*. Diakses dari <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/a-coal-fired-thermoelectric-power-plant>
- World Nuclear Association. (2022). *Radioactive waste management*. Diakses dari <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/radioactive-waste-management>
- Wulandari, Handini. (2008). *Performa Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna (DSSC) Berbasis ZnO dengan Variasi Tingkat Pengisian dan Besar Kristalit TiO<sub>2</sub>*. Universitas Indonesia: Depok.
- Zhang, J., & Smith, K. R. (2019). *Reducing CO<sub>2</sub> emissions from coal-fired power plants in China: Challenges and opportunities for policy intervention*. Energy Policy, 131, 333-341