

# EKONOMI TEKNIK DAN ENERGI LISTRIK

Editor: Rikhanatus Saliha, S.Sos.





# **Ekonomi Teknik dan Energi Listrik**

**Ir. Fadhli Farsa, S.T., M.T., IPP. Dkk.**

Editor: Rikhanatus Saliha, S.Sos.

PT CIPTA DIGITAL EDUKASI

Anggota IKAPI: No. 666/DKI/2026



# Ekonomi Teknik dan Energi Listrik

Penulis : Ir. Fadhli Farsa, S.T., M.T., IPP., Ade Irawaty Tolago, ST., MT., Ir. Andi Abdul Halik Lateko, Ph.D., Prof. Dr. Ir. Sudirman Syam, ST., MT., IPM., Prof. Dr. Ir. Machmud Effendy, ST., M.Eng., Dr. Ir. Muhammad Yusan Naim, MSc., Ir. Suparman, S.T., M.T., Ir. Yulianto La Elo, S.T., M.T., IPM., Ir. Levin Halim, S.T., M.T., dan Dr. Ir. Muh. Nawir Toasim, ST., MT., IPU.

ISBN : 978-634-7777-52-2 (PDF)

Penyunting Naskah : Rikhanatus Saliha, S.Sos.

Tata Letak : Rikhanatus Saliha, S.Sos.

Desain Sampul : Novikean Keysah Sanisri

## Penerbit

PT Cipta Digital Edukasi

Jl. Wijaya Ii/Wijaya Grand Centre Blok G-15, Desa/Kelurahan Pulo, Kec. Kebayoran Baru, Kota Adm. Jakarta Selatan, Provinsi DKI Jakarta, Kode Pos: 1216

E-Mail : penerbitcde@gmail.com

Website : cideka.com

© Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak Ciptaan tersebut pertama kali dilakukan pengumuman.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit. Ketentuan Pidana Sanksi Pelanggaran Pasal 2 UU Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta.

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

# KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunnya buku referensi yang berjudul *Ekonomi Teknik dan Energi Listrik*. Buku ini hadir untuk memberikan pemahaman mengenai konsep-konsep ekonomi teknik yang diterapkan dalam sektor energi listrik, serta bagaimana perencanaan dan pengelolaan sumber daya listrik dapat dilakukan secara efisien dan berkelanjutan. Melalui buku ini, pembaca diharapkan dapat memahami hubungan antara aspek teknis dan ekonomi dalam pengelolaan energi listrik serta dampaknya terhadap biaya operasional dan kebijakan energi.

Buku ini ditujukan untuk masyarakat umum agar menjadi bacaan yang mudah dipahami oleh mahasiswa, praktisi teknik, pelaku industri energi, maupun siapa saja yang memiliki minat terhadap pengelolaan energi listrik.

Jakarta, Mei 2026

Tim Penyusun

# DAFTAR ISI

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                                           | <b>iii</b> |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                                               | <b>iv</b>  |
| <b>Bab 1: Karakteristik Biaya pada Sistem Teknik dan Energi ....</b> | <b>1</b>   |
| Ir. Levin Halim, S.T., M.T. ....                                     | 128        |
| 1.1 Konsep Dasar Biaya dalam Sistem Teknik dan Energi .....          | 1          |
| 1.2 Biaya Modal dan Biaya Investasi Awal .....                       | 7          |
| 1.3 Biaya Operasional dan Pemeliharaan .....                         | 10         |
| 1.4 Analisis Biaya Siklus Hidup (Life Cycle Cost).....               | 13         |
| 1.5 Metode-Metode Analisis Biaya Lanjutan.....                       | 17         |
| <b>Bab 2: Konsep Nilai Waktu Uang dalam Analisis Teknik.....</b>     | <b>21</b>  |
| Ade Irawaty Tolago, ST., MT. ....                                    | 21         |
| 2.1 Pengertian dan Prinsip Dasar Nilai Waktu Uang .....              | 21         |
| 2.2 Bunga Sederhana dan Bunga Majemuk.....                           | 24         |
| 2.3 Nilai Sekarang dan Nilai Masa Depan .....                        | 26         |
| 2.4 Anuitas (Anuitas).....                                           | 28         |
| 2.5 Metode Evaluasi Investasi Berbasis Nilai Waktu Uang .....        | 31         |
| 2.6 Aplikasi Praktis dan Studi Kasus.....                            | 33         |
| <b>Bab 3: Analisis Metode Kelayakan Ekonomi Teknik.....</b>          | <b>35</b>  |
| Ir. Andi Abdul Halik Lateko, Ph.D. ....                              | 35         |
| 3.1 Konsep Dasar dan Pengenalan Kelayakan Ekonomi Teknik .....       | 35         |
| 3.2 Metode Nilai Sekarang Bersih (NPV) .....                         | 37         |
| 3.3 Metode Tingkat Pengembalian Internal (IRR) .....                 | 40         |
| 3.4 Metode Payback Period dan Benefit-Cost Ratio .....               | 42         |
| 3.5 Analisis Sensitivitas dan Pengambilan Keputusan .....            | 44         |
| <b>Bab 4: Analisis Biaya Investasi Sistem Energi Listrik .....</b>   | <b>47</b>  |
| Prof. Dr. Ir. Sudirman Syam, ST., MT., IPM. ....                     | 47         |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1 Konsep Dasar Analisis Biaya Sistem Investasi Energi.....              | 47         |
| 4.2 Metode Perhitungan Biaya Investasi Sistem Energi.....                 | 50         |
| 4.3 Analisis Biaya Sistem Energi Terbarukan.....                          | 53         |
| 4.4 Analisis Biaya Investasi Sistem Energi Hybrid dan Terintegrasi..      | 56         |
| 4.5 Evaluasi dan Pemilihan Skenario Investasi Energi Listrik.....         | 59         |
| <b>Bab 5: Analisis Biaya Operasi dan Pemeliharaan .....</b>               | <b>63</b>  |
| Prof. Dr. Ir. Machmud Effendy, ST., M.Eng.....                            | 63         |
| 5.1 Konsep Dasar Analisis Biaya Operasi.....                              | 63         |
| 5.2 Analisis Biaya Pemeliharaan Preventif .....                           | 66         |
| 5.3 Pemeliharaan Prediktif dan Teknologi Monitoring .....                 | 69         |
| 5.4 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA) .....                              | 72         |
| 5.5 Optimalisasi Biaya dan Strategi Penghematan .....                     | 76         |
| <b>Bab 6: Break-Even dan Sensitivitas .....</b>                           | <b>80</b>  |
| Dr. Ir. Muhammad Yusan Naim, MSc. ....                                    | 80         |
| 6.1 Konsep Dasar Titik Impas .....                                        | 80         |
| 6.2 Analisis Biaya-Volume-Laba (CVP).....                                 | 83         |
| 6.3 Margin Keamanan dan Penilaian Risiko .....                            | 87         |
| 6.4 Analisis Sensitivitas dalam Perencanaan Keuangan.....                 | 90         |
| 6.5 Penerapan Praktis Titik Impas dan Sensitivitas dalam Industri.....    | 94         |
| <b>Bab 7: Daftar Energi Pembangkitan Ekonomi .....</b>                    | <b>98</b>  |
| Ir. Suparman, S.T., M.T.....                                              | 98         |
| 7.1 Konsep Dasar Ekonomi Pembangkitan Energi Listrik.....                 | 98         |
| 7.2 Komponen Biaya Pembangkitan Energi Listrik .....                      | 100        |
| 7.3 Metode Perhitungan Biaya Pembangkitan Energi Listrik .....            | 103        |
| 7.4 Analisis Kelayakan Finansial Proyek Pembangkitan Energi Listrik ..... | 105        |
| 7.5 Studi Kasus Ekonomi Pembangkitan Energi Listrik .....                 | 107        |
| <b>Bab 8: Tarif dan Harga Daftar Energi .....</b>                         | <b>110</b> |
| Ir. Yulianto La Elo, S.T., M.T., IPM. ....                                | 110        |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.1 Fondasi Sistem Tarif Energi Listrik .....                                | 110        |
| 8.2 Struktur Tarif Listrik Konvensional .....                                | 114        |
| 8.3 Tarif Berbasis Waktu (Waktu Penggunaan - ToU) .....                      | 117        |
| 8.4 Penetapan Harga Dinamis dan Real-Time.....                               | 120        |
| 8.5 Analisis Biaya dan Efisiensi Tarif Ekonomi .....                         | 124        |
| <b>Bab 9: Investasi Proyek Energi Listrik.....</b>                           | <b>128</b> |
| Ir. Fadhli Farsa, S.T., M.T., IPP. ....                                      | 1          |
| 9.1 Konsep dan Jenis-Jenis Investasi Energi Listrik .....                    | 128        |
| 9.2 Analisis Kelayakan Teknis Proyek Energi Listrik.....                     | 131        |
| 9.3 Analisis Kelayakan Finansial dan Ekonomi .....                           | 134        |
| 9.4 Optimasi Kapasitas dan Skenario Investasi.....                           | 137        |
| 9.5 Implementasi dan Pemantauan Proyek Energi Listrik.....                   | 140        |
| <b>Bab 10: Evaluasi dan Interpretasi Analisis Ekonomi Sistem Energi.....</b> | <b>143</b> |
| Dr. Ir. Muh. Nawir Toasim, ST., MT., IPU.....                                | 143        |
| 10.1 Prinsip-Prinsip Dasar Evaluasi Analisis Ekonomi .....                   | 143        |
| 10.2 Interpretasi Hasil Analisis Ekonomi Sistem Energi .....                 | 148        |
| 10.3 Analisis Sensitivitas dan Ketidakpastian Manajemen .....                | 152        |
| 10.4 Perbandingan dan Ranking Alternatif Sistem Energi .....                 | 156        |
| 10.5 Rekomendasi dan Implikasi Kebijakan dari Analisis Ekonomi               | 160        |
| <b>Profil Penulis .....</b>                                                  | <b>165</b> |
| <b>Daftar Pustaka.....</b>                                                   | <b>175</b> |

# Bab 1: Karakteristik Biaya pada Sistem Teknik dan Energi

---

Ir. Fadhli Farsa, S.T., M.T., IPP.

## 1.1 Konsep Dasar Biaya dalam Sistem Teknik dan Energi

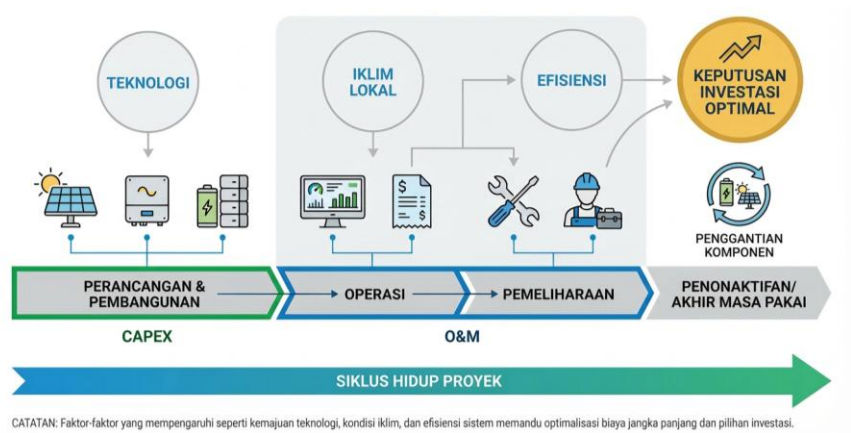
### 1.1.1 Definisi dan Klasifikasi Biaya

Biaya dalam sistem teknik dan energi merupakan pengeluaran yang diperlukan untuk merancang, membangun, mengoperasikan, dan memelihara infrastruktur teknik serta sistem pembangkit energi. Biaya dapat diklasifikasikan beberapa menjadi jenis utama: biaya modal (*capital cost*), biaya operasional (*operational cost*), biaya pemeliharaan (*maintenance cost*), dan biaya penggantian (*replacement cost*) (Sitorus et al., 2022). Setiap jenis biaya memiliki karakteristik, waktu terjadinya, dan dampak terhadap kinerja keuangan proyek yang berbeda-beda (Franata et al., 2025).

Dalam konteks pembangunan infrastruktur energi seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (*PLTS*), biaya modal mencakup pembelian peralatan utama seperti panel surya, inverter, sistem penyimpanan energi (*baterai*), dan sistem instalasi secara keseluruhan. Biaya operasional dan pemeliharaan sangat dipengaruhi oleh teknologi yang digunakan, kondisi iklim lokal, dan

efisiensi sistem yang diterapkan (Sitorus et al., 2022). Pemahaman yang tepat tentang komposisi karakteristik dan biaya-biaya ini sangat penting untuk pengambilan keputusan investasi yang optimal dalam proyek-proyek teknik dan energi.

Untuk memahami ekonomi teknik pada sistem energi listrik, biaya tidak cukup dilihat sebagai “angka total”, tetapi perlu dipetakan sepanjang siklus hidup proyek. Setiap fase, mulai dari perancangan dan pembangunan hingga operasi serta pemeliharaan, memunculkan komponen biaya yang berbeda, dengan waktu terjadinya dan dampak finansial yang juga berbeda. Karena itu, kerangka life-cycle cost membantu pembaca melihat keterkaitan antara keputusan teknik di awal proyek dan konsekuensi biaya jangka panjang.



Gambar 1. Ilustrasi skema *life-cycle cost* proyek PLTS

Sebagai contoh, pada proyek PLTS yang diilustrasikan oleh Gambar 1, biaya modal (*capital cost*) umumnya dominan pada tahap

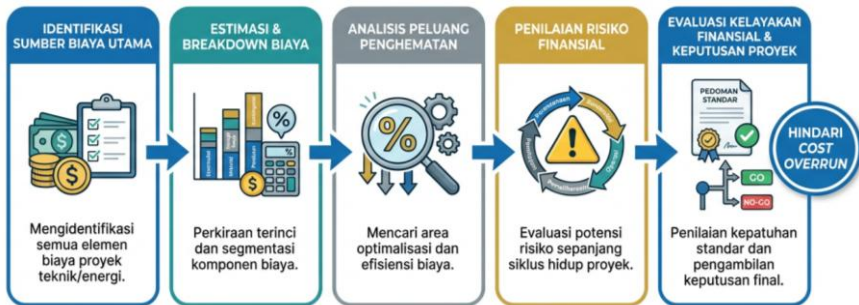
perancangan dan pembangunan, sedangkan biaya operasional dan pemeliharaan (*Operation & Maintenance – O&M*) mendominasi selama masa operasi. Selain itu, biaya penggantian (*replacement cost*) dapat muncul ketika komponen utama, misalnya inverter atau baterai, mencapai akhir umur pakainya. Faktor seperti kemajuan teknologi, kondisi iklim lokal, dan efisiensi sistem akan memengaruhi besarnya *O&M* dan kebutuhan penggantian komponen, sehingga pada akhirnya menentukan keputusan investasi yang paling optimal.

### **1.1.2 Pentingnya Analisis Biaya dalam Perencanaan Proyek**

Analisis biaya yang komprehensif merupakan salah satu aspek kritis dalam perencanaan dan kelayakan finansial proyek teknik dan energi. Dengan melakukan analisis biaya yang mendalam, dapat diidentifikasi sumber-sumber biaya utama, peluang penghematan, dan risiko finansial yang mungkin terjadi selama siklus hidup proyek (Puhessti, 2021). Penerapan metode analisis biaya yang tepat dapat membantu pemangku kepentingan dalam mengambil keputusan yang lebih baik dan mengurangi efektivitas investasi (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025).

Pentingnya analisis biaya yang tercermin dalam berbagai standar dan pedoman internasional yang menekankan perlunya evaluasi finansial menyeluruh sebelum pelaksanaan proyek. Banyak proyek infrastruktur di Indonesia yang mengalami masalah anggaran karena kurangnya biaya perencanaan yang terperinci dan analisis risiko yang memadai pada tahap awal proyek (Franata et al., 2025).

Analisis biaya yang komprehensif merupakan fondasi utama dalam perencanaan proyek teknik dan energi karena menentukan apakah suatu proyek layak secara finansial sebelum dieksekusi. Seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 2, melalui analisis yang sistematis, pemangku kepentingan dapat memetakan sumber biaya dominan, memperkirakan kebutuhan anggaran secara realistis, serta mengidentifikasi area yang berpotensi dioptimalkan sehingga keputusan investasi tidak didasarkan pada asumsi yang lemah.



Gambar 2. Alur analisis biaya dalam perencanaan proyek teknik dan energi

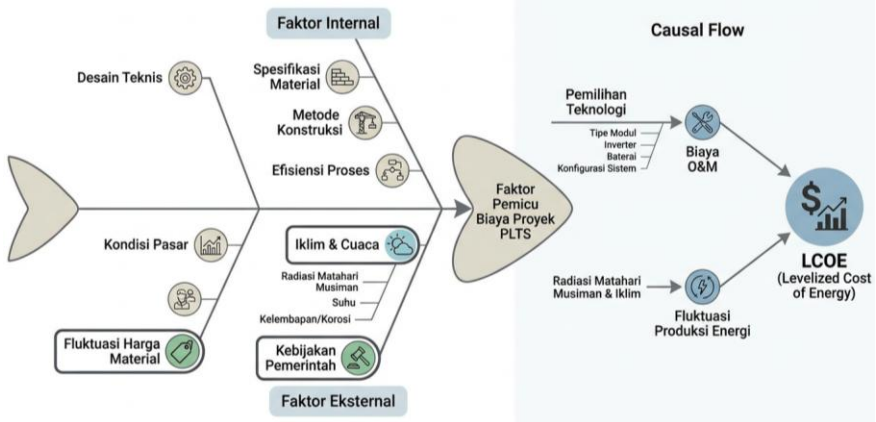
Selain memetakan biaya, analisis biaya juga harus memasukkan penilaian risiko finansial yang mungkin muncul sepanjang siklus hidup proyek. Praktik ini sejalan dengan berbagai standar dan pedoman internasional yang menuntut evaluasi finansial menyeluruh pada tahap awal, karena banyak kegagalan proyek—termasuk pembengkakan anggaran—berawal dari perencanaan biaya yang tidak rinci dan mitigasi risiko yang tidak memadai. Gambar berikut merangkum alur kerja analisis biaya dari tahap identifikasi hingga keputusan proyek.

### 1.1.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Biaya

Biaya pada sistem teknik dan energi dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal. Faktor internal meliputi desain teknis, spesifikasi material, metode konstruksi, dan efisiensi proses produksi. Faktor eksternal meliputi kondisi pasar, fluktuasi harga material, kondisi iklim, dan kebijakan pemerintah (Lumbanbatu & Sriyanto, 2025). Biaya operasional dan pemeliharaan sangat dipengaruhi oleh teknologi yang dipilih dan kondisi lingkungan tempat sistem beroperasi (Febrianti & Dewi, 2024).

Untuk sistem energi terbarukan seperti PLTS, faktor cuaca dan kondisi geografis sangat mempengaruhi efisiensi dan biaya operasional jangka panjang. Radiasi matahari yang bervariasi sepanjang tahun menyebabkan produksi energi yang fluktuatif, yang pada gilirannya mempengaruhi satuan biaya energi (*Levelized Cost of Electricity* atau *LCOE*) (Sitorus et al., 2022).

Biaya pada sistem teknik dan energi tidak ditentukan oleh satu komponen tunggal, melainkan merupakan hasil interaksi berbagai faktor internal dan eksternal. Faktor internal, seperti desain teknis, spesifikasi material, metode konstruksi, dan efisiensi proses. Hal ini mencerminkan keputusan rekayasa yang berada dalam kendali perencanaan proyek. Sementara itu, faktor eksternal, seperti kondisi pasar, fluktuasi harga material, iklim, dan kebijakan pemerintah sering kali berada di luar kendali, namun dapat berdampak signifikan terhadap total biaya proyek.



Gambar 3. Faktor-faktor internal dan eksternal yang memengaruhi biaya proyek PLTS

Pada konteks energi terbarukan seperti PLTS, seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 3, pengaruh faktor eksternal terutama iklim dan cuaca menjadi sangat dominan terhadap kinerja operasi jangka panjang. Variasi radiasi matahari sepanjang tahun dapat menyebabkan produksi energi berfluktuasi, yang pada akhirnya memengaruhi satuan biaya energi atau LCOE. Oleh karena itu, pemetaan hubungan sebab-akibat dari faktor pemicu biaya hingga dampaknya pada O&M dan LCOE penting untuk memperkuat dasar pengambilan keputusan desain, pemilihan teknologi, dan strategi pengelolaan biaya.

#### 1.1.4 Hubungan Antara Kualitas, Fungsi, dan Biaya

Dalam sistem teknik dan energi, terdapat hubungan yang kompleks antara kualitas, fungsi, dan biaya. Peningkatan kualitas dan fungsi sering mengakibatkan peningkatan biaya awal (*initial cost*), namun dapat menghasilkan penghematan biaya

operasional dan pemeliharaan dalam jangka panjang (Kurniawan & Pramesti, 2024). Oleh karena itu, pendekatan *Life Cycle Cost (LCC)* yang mempertimbangkan seluruh biaya selama siklus hidup proyek menjadi sangat penting untuk pengambilan keputusan yang optimal (Franata et al., 2025).

## **1.2 Biaya Modal dan Biaya Investasi Awal**

### **1.2.1 Komponen-Komponen Biaya Modal**

Biaya modal dalam sistem teknik dan energi umumnya terdiri dari beberapa komponen utama: biaya peralatan dan komponen (*equipment cost*), biaya konstruksi dan instalasi (*construction cost*), biaya engineering dan desain (*engineering cost*), dan biaya overhead proyek (*project overhead*) (Sitorus et al., 2022). Untuk proyek PLTS dengan kapasitas 150 kWp, biaya modal dapat mencapai sekitar Rp 1,2-1,3 miliar, dengan komposisi terbesar adalah biaya panel surya dan inverter (Sitorus et al., 2022).

Dalam proyek infrastruktur transportasi dan jembatan, biaya modal seringkali mencapai 72-96% dari total biaya siklus hidup, dengan sisanya menjadi biaya operasional dan pemeliharaan (Franata et al., 2025). Akurasi perhitungan biaya modal sangat penting karena kesalahan estimasi dapat menyebabkan keterlambatan dan ketidaksesuaian anggaran proyek.

### **1.2.2 Estimasi Biaya Modal dan *Model Biaya***

Estimasi biaya modal dilakukan melalui berbagai metode, mulai dari analisis parametrik, perbandingan proyek serupa, hingga

analisis detail berdasarkan item pekerjaan (*cost breakdown*). Metode *model biaya* yang terstruktur memungkinkan pengidentifikasian kategori biaya utama dan sub-kategori yang lebih detail (Sugiandhari et al., 2024). Untuk proyek yang kompleks, penggunaan *Building Information Modeling (BIM)* dapat meningkatkan akurasi estimasi biaya dengan mengintegrasikan informasi geometri, material, dan spesifikasi teknis dalam satu model (Kurniawan & Pramesti, 2024).

Dalam praktik analisis biaya teknik, Pareto sering digunakan untuk mengidentifikasi item-item pekerjaan yang memiliki kontribusi biaya tertinggi (biasanya 20% item pekerjaan menyumbang 80% dari total biaya) sehingga dapat difokuskan untuk optimalisasi (Sugiandhari et al., 2024).

### **1.2.3 Strategi Penghematan Biaya Modal**

Penghematan biaya modal dapat dicapai melalui berbagai strategi termasuk optimalisasi desain, pemilihan material alternatif yang lebih ekonomis, perubahan metode konstruksi, dan negosiasi dengan pemasok (Sugiandhari et al., 2024). Metode *Value Engineering (VE)* adalah teknik sistematis yang dirancang untuk meningkatkan nilai (*value*) proyek dengan mempertahankan fungsi namun mengurangi biaya (Sugiandhari et al., 2024).

Penerapan VE pada proyek konstruksi gedung telah menunjukkan hasil penghematan biaya yang signifikan, berkisar antara 5-18% dari estimasi biaya awal (Sugiandhari et al., 2024). Pada proyek PLTS, penghematan dapat dicapai melalui pemilihan komponen berkualitas tinggi namun dengan harga kompetitif, serta

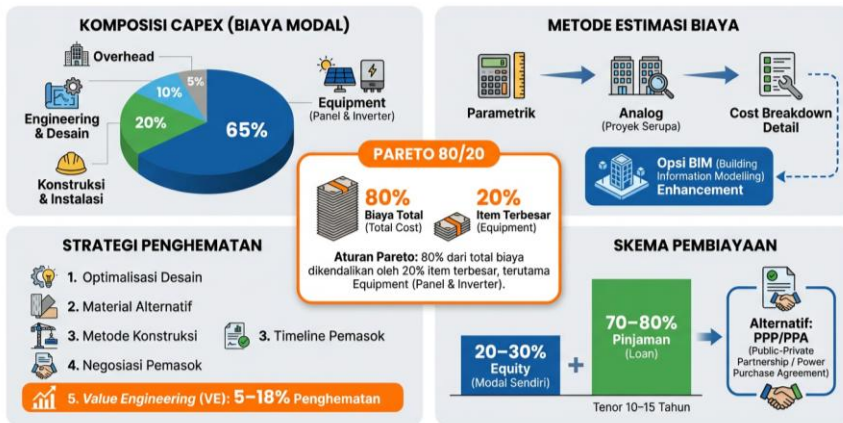
optimalisasi desain sistem untuk mengurangi jumlah komponen yang diperlukan (Sitorus et al., 2022).

#### **1.2.4 Pendanaan dan Skema Pembiayaan Proyek**

Skema pendanaan proyek infrastruktur energi umumnya menggunakan kombinasi modal sendiri dan pinjaman bank. Perbandingan modal sendiri dan pinjaman mempengaruhi struktur biaya modal dan tingkat pengembalian investasi (*laba atas investasi*) (Sitorus et al., 2022). Untuk proyek PLTS, struktur pendanaan yang umum adalah 20-30% modal sendiri dan 70-80% pinjaman bank dengan periode pengembalian 10-15 tahun (Sitorus et al., 2022).

Selain itu, terdapat berbagai skema pembiayaan inovatif seperti *Public-Private Partnership (PPP)*, *power purchase agreement (PPA)*, dan skema pajak yang mendukung investasi energi terbarukan (Harja et al., 2026). Pemilihan skema pendanaan yang tepat dapat mempengaruhi tingkat suku bunga, jangka waktu pembayaran, dan viabilitas proyek finansial secara keseluruhan.

Biaya modal dan investasi awal merupakan komponen dominan dalam banyak proyek teknik dan energi, khususnya pada proyek PLTS (Gambar 4), karena mencakup pengadaan peralatan utama, pekerjaan konstruksi dan instalasi, aktivitas engineering–desain, serta overhead proyek. Oleh sebab itu, pemahaman tentang komposisi CAPEX menjadi penting untuk menentukan fokus pengendalian biaya sejak tahap perencanaan, sekaligus mengurangi risiko kesalahan estimasi yang dapat berujung pada keterlambatan maupun ketidaksesuaian anggaran.



Gambar 4. Ringkasan biaya modal dan investasi awal proyek PLTS

Selain memahami komposisi biaya, perencanaan investasi awal juga menuntut metode estimasi yang tepat, identifikasi item biaya dominan (misalnya melalui prinsip Pareto 80/20), serta strategi penghematan seperti optimalisasi desain dan *Value Engineering* untuk mempertahankan fungsi sambil menekan biaya. Di sisi lain, struktur pendanaan yang merupakan kombinasi ekuitas dan pinjaman, maupun alternatif PPP/PPA akan memengaruhi beban biaya modal dan kelayakan finansial proyek secara keseluruhan. Gambar berikut merangkum keterkaitan elemen-elemen tersebut dalam satu tampilan.

## 1.3 Biaya Operasional dan Pemeliharaan

### 1.3.1 Komponen Biaya Operasional

Biaya operasional (*operational cost* atau *OPEX*) mencakup semua pengeluaran yang diperlukan untuk menjalankan sistem

selama periode operasi yang direncanakan. Untuk sistem PLTS, biaya operasionalnya relatif rendah karena tidak memerlukan bahan bakar dan pemeliharaan rutin yang minimal (Sitorus et al., 2022). Namun, biaya operasional dapat meningkat seiring waktu karena degradasi efisiensi peralatan, khususnya panel surya yang mengalami penurunan efisiensi sekitar 0,5-0,8% per tahun (Wiranata et al., 2025).

Untuk sistem pembangkit listrik konvensional berbahan bakar bakar, biaya operasional didominasi oleh biaya bahan bakar, yang dapat mencapai 60-80% dari total biaya operasional (Yuliani et al., 2022). Biaya operasional lainnya meliputi biaya gaji operator, biaya listrik untuk peralatan bantu, dan biaya asuransi (Yuliani et al., 2022).

### **1.3.2 Biaya Pemeliharaan dan Penggantian**

Biaya pemeliharaan (*maintenance cost*) merupakan pengeluaran berkala yang diperlukan untuk menjaga fungsi dan kinerja sistem. Untuk infrastruktur jembatan dan jalan, biaya pemeliharaan rutin dapat mencapai 2-3% dari biaya awal per tahun, sedangkan pemeliharaan berkala dilakukan setiap 5-10 tahun (Franata et al., 2025). Biaya penggantian (*replacement cost*) diperlukan ketika komponen-komponen utama telah mencapai akhir umur manfaatnya dan perlu diganti sepenuhnya (Puhessti, 2021).

Dalam sistem PLTS, inverter biasanya perlu diganti setelah 10-15 tahun beroperasi, sementara panel surya dapat bertahan hingga 25-30 tahun namun dengan efisiensi yang terus menurun (Wiranata et al., 2025). Perencanaan biaya penempatan yang baik

memerlukan perkiraan yang akurat tentang umur manfaat setiap komponen dan proyeksi harga penempatan di masa depan.

### **1.3.3 Strategi Optimalisasi Biaya Operasional**

Optimalisasi biaya operasional dapat dicapai melalui berbagai strategi: peningkatan efisiensi energi, penggunaan otomasi dan sistem manajemen pintar, pemeliharaan preventif yang terjadwal, dan pelatihan operator yang baik (Dewantara et al., 2025). Implementasi sistem manajemen energi cerdas (*smart energy management*) pada sistem PLTS dapat mengurangi biaya operasional hingga 15-30% dengan mengoptimalkan penggunaan energi yang tersimpan dan mengurangi pemborosan (Dewantara et al., 2025).

Penggunaan teknologi *Internet of Things (IoT)* dan sistem monitoring real-time memungkinkan deteksi dini kerusakan dan gangguan, sehingga dapat dilakukan perbaikan sebelum terjadi kerusakan yang lebih parah dan biaya perbaikan yang lebih tinggi (Dewantara et al., 2025).

### **1.3.4 Proyeksi Biaya Operasional Jangka Panjang**

Proyeksi biaya operasional jangka panjang memerlukan pemahaman yang baik tentang faktor-faktor yang mempengaruhi biaya operasional seperti inflasi, degradasi peralatan, perubahan teknologi, dan kerusakan harga bahan bakar (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Untuk periode operasi 20-25 tahun, biaya operasional yang diproyeksikan dengan akurat dapat menunjukkan perbedaan signifikan antara berbagai pilihan teknologi dan strategi pemeliharaan (Wiranata et al., 2025).

Analisis sensitivitas terhadap parameter-parameter kunci seperti tingkat inflasi, efisiensi peralatan, dan harga energi sangat penting untuk memahami risiko keuangan dan membuat keputusan yang kuat (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025).

## **1.4 Analisis Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost*)**

### **1.4.1 Konsep dan Metodologi *Biaya Siklus Hidup***

*Life Cycle Cost (LCC)* adalah metode analisis yang mempertimbangkan seluruh biaya yang terkait dengan suatu proyek atau sistem selama seluruh umur hidupnya, mulai dari tahap perencanaan, desain, konstruksi, operasi, pemeliharaan, hingga akhir umur manfaat (*end-of-life*) (Franata et al., 2025). Metodologi LCC memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang total biaya yang akan dikeluarkan dibandingkan dengan hanya mempertimbangkan biaya awal saja (Puhessti, 2021).

Penerapan LCC sangat penting untuk infrastruktur jangka panjang seperti jembatan, jalan, dan sistem energi yang akan beroperasi selama 20-100 tahun (Franata et al., 2025). Dengan menggunakan pendekatan LCC, dapat diidentifikasi opsi yang paling ekonomis dalam jangka panjang, bahkan jika biaya awalnya lebih tinggi (Kurniawan & Pramesti, 2024).

### **1.4.2 Komponen-Komponen Biaya dalam Analisis LCC**

Komponen-komponen analisis utama dalam LCC meliputi: biaya awal (*initial cost*), biaya operasional tahunan (*annual operating cost*), biaya pemeliharaan rutin dan berkala (*maintenance*

*cost*), biaya penggantian komponen (*replacement cost*), biaya pembongkaran atau pemulihan akhir (*end-of-life cost*), dan *nilai sisa* jika ada (Franata et al., 2025). Untuk gedung dengan rencana umur 40-50 tahun, biaya awal biasanya 50-60% dari total LCC, sementara biaya operasional dan pemeliharaan 40-50% sisa (Puhessti, 2021).

Dalam analisis LCC untuk infrastruktur jalan, biaya awal konstruksi mencapai 72-96% dari total LCC, sedangkan biaya operasional dan pemeliharaan mencapai 4-28%, tergantung pada jenis perkerasan dan umur rencana yang digunakan (Franata et al., 2025).

#### **1.4.3 Teknik Perhitungan LCC dan Discount Rate**

Perhitungan LCC memerlukan perubahan semua biaya yang terjadi pada waktu yang berbeda menjadi nilai sekarang (*present value*) dengan menggunakan *tingkat diskonto* tertentu. *Tingkat diskonto* atau tingkat diskonto yang digunakan biasanya berkisar antara 3-12%, tergantung pada tingkat pengembalian modal yang diharapkan dan kondisi ekonomi makro (Franata et al., 2025). Pemilihan *tingkat diskonto* yang tepat sangat mempengaruhi hasil analisis LCC, terutama untuk proyek dengan umur manfaat yang sangat panjang (Wiranata et al., 2025).

Rumus dasar untuk menghitung *nilai sekarang* adalah:  $PV = FV / (1 + r)^n$ , di mana FV adalah nilai di masa depan, r adalah tingkat diskonto, dan n adalah jumlah tahun (Franata et al., 2025). Dalam praktiknya, perhitungan LCC untuk proyek yang kompleks

biasanya menggunakan spreadsheet atau software khusus yang dapat menangani berbagai skenario dan analisis sensitivitas.

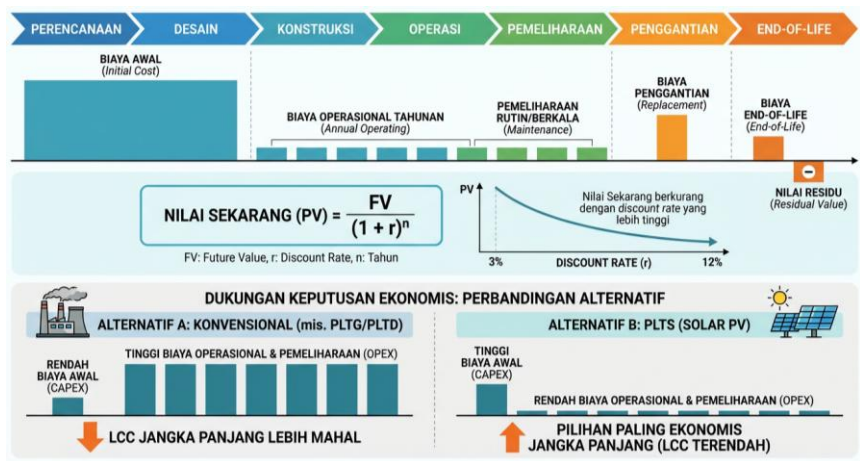
#### **1.4.4 Penggunaan LCC untuk Pengambilan Keputusan**

Analisis LCC memberikan informasi yang lebih komprehensif untuk perbandingan alternatif desain atau teknologi yang berbeda. Dengan menggunakan LCC, dapat diidentifikasi bahwa alternatif dengan biaya awal yang lebih tinggi dapat lebih ekonomis dalam jangka panjang jika biaya operasional dan pemeliharaannya lebih rendah (Kurniawan & Pramesti, 2024). Sebagai contoh, dalam pemilihan jenis perkerasan jalan, analisis LCC dapat menunjukkan bahwa perkerasan kaku (beton) dengan biaya awal lebih tinggi dapat lebih ekonomis dibandingkan perkerasan lentur (aspal) yang memerlukan pemeliharaan berkala yang lebih sering (Franata et al., 2025).

Penggunaan LCC dalam pengambilan keputusan investasi energi terbarukan menunjukkan bahwa meskipun biaya awal PLTS lebih tinggi, *Levelized Cost of Electricity (LCOE)* yang seringkali dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan energi konvensional dalam jangka panjang (Sitorus et al., 2022).

Analisis *Life Cycle Cost (LCC)* digunakan untuk menilai total biaya suatu proyek atau sistem sepanjang umur manfaatnya, bukan hanya biaya investasi awal. Seperti yang diperlihatkan oleh Pendekatan ini mencakup biaya sejak tahap perencanaan, desain, dan konstruksi, kemudian biaya selama operasi, pemeliharaan rutin/berkala, penggantian komponen, hingga biaya akhir masa pakai (*end-of-life*), serta mempertimbangkan nilai residu jika ada.

Dengan demikian, LCC memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai beban biaya total yang akan ditanggung selama siklus hidup proyek.



Gambar 5. Kerangka Kerja Life Cycle Cost (LCC) untuk Pengambilan Keputusan Strategis: Komponen Biaya, Konversi Present Value (PV), dan Perbandingan Alternatif Konvensional vs PLTS.

Karena biaya muncul pada waktu yang berbeda, perhitungan LCC memerlukan konversi seluruh biaya masa depan menjadi nilai sekarang (present value) menggunakan tingkat diskonto tertentu. Pemilihan discount rate sangat menentukan hasil analisis, terutama pada proyek berumur panjang, karena memengaruhi bobot biaya yang terjadi di masa depan terhadap total biaya saat ini. Informasi LCC kemudian digunakan untuk membandingkan alternatif desain atau teknologi, sehingga opsi dengan biaya awal lebih tinggi dapat tetap dipilih jika terbukti lebih ekonomis dalam jangka panjang

akibat OPEX dan biaya pemeliharaan yang lebih rendah, seperti perbandingan umum antara pembangkit konvensional dan PLTS.

## **1.5 Metode-Metode Analisis Biaya Lanjutan**

### **1.5.1 Analisis Kelayakan Finansial dan Indikator Investasi**

Analisis kelayakan proyek finansial meliputi perhitungan berbagai indikator investasi untuk menghasilkan apakah proyek layak dilaksanakan secara finansial. Indikator-indikator utama meliputi: *Net Present Value (NPV)*, *Internal Rate of Return (IRR)*, *Payback Period (PP)*, dan *Benefit-Cost Ratio (BCR)* (Sitorus et al., 2022). NPV yang positif menunjukkan bahwa proyek menghasilkan nilai tambah yang positif, sedangkan IRR yang lebih tinggi dari *Weighted Average Cost of Capital (WACC)* menunjukkan bahwa proyek menghasilkan pengembalian yang lebih tinggi dari biaya modal (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025).

Untuk proyek PLTS dengan kapasitas 150 kWp, analisis finansial menunjukkan NPV positif sebesar sekitar Rp 830 juta dengan *titik impas* sekitar 7,27 tahun, menunjukkan kelayakan investasi yang baik (Sitorus et al., 2022). Payback period yang panjang (7-15 tahun) memerlukan pertimbangan khusus karena periode ini melebihi masa garansi sebagian besar peralatan (Sitorus et al., 2022).

### **1.5.2 Rekayasa Nilai dan Optimalisasi Biaya**

*Value Engineering (VE)* adalah metodologi sistematis untuk meningkatkan nilai (*value*) proyek dengan mempertahankan atau

meningkatkan fungsi sambil mengurangi biaya (Sugiandhari et al., 2024). Proses VE melibatkan lima tahapan utama: tahap informasi (pengumpulan data), tahap kreatif (brainstorming alternatif), tahap evaluasi (penilaian alternatif), tahap pengembangan (analisis detail), dan tahap rekomendasi (penetapan rekomendasi final) (Sugiandhari et al., 2024).

Penerapan VE pada proyek konstruksi telah menunjukkan hasil penghematan biaya yang signifikan. Pada proyek pembangunan gedung, penghematan dapat mencapai 5-18% dari estimasi biaya awal dengan tetap mempertahankan fungsi dan kualitas bangunan (Sugiandhari et al., 2024). Integrasi VE dengan analisis LCC memungkinkan perbandingan alternatif tidak hanya berdasarkan biaya awal namun juga biaya siklus hidup (Sugiandhari et al., 2024).

### **1.5.3 Analisis Sensitivitas dan Risiko Finansial**

Analisis sensitivitas (*sensitivitas analysis*) dilakukan untuk menunjukkan bagaimana perubahan parameter-parameter kunci mempengaruhi hasil analisis finansial seperti NPV, IRR, dan payback period (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Parameter-parameter yang biasanya dianalisis sensitivitasnya meliputi: biaya awal, tingkat inflasi, tingkat diskonto, efisiensi peralatan, dan harga energi (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025).

Analisis Monte Carlo merupakan teknik probabilistik yang dapat digunakan untuk memodelkan izin dalam berbagai parameter proyek dan menghasilkan distribusi hasil analisis (Nuryanti et al., 2015). Dengan menggunakan analisis Monte Carlo, dapat

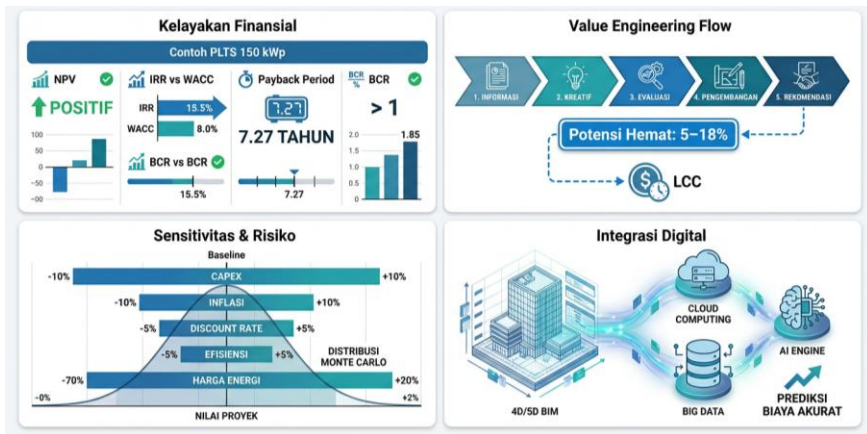
mengidentifikasi risiko finansial dan menetapkan strategi mitigasi risiko yang lebih baik (Nuryanti et al., 2015).

#### **1.5.4 Integrasi BIM dan Teknologi Digital dalam Analisis Biaya**

*Building Information Modeling (BIM)* memungkinkan integrasi informasi geometri, material, dan spesifikasi teknis dalam satu model tiga dimensi yang dapat digunakan untuk berbagai tujuan analisis, termasuk estimasi biaya (*5D BIM*) dan penjadwalan proyek (*4D BIM*) (Kurniawan & Pramesti, 2024). Penggunaan BIM dapat meningkatkan akurasi estimasi biaya, mengurangi kesalahan desain yang dapat menyebabkan biaya tambahan, dan mempercepat proses estimasi biaya (Kurniawan & Pramesti, 2024).

Teknologi digital lainnya seperti *Cloud Computing*, *Big Data Analytics*, dan *Artificial Intelligence* mulai diterapkan dalam analisis biaya proyek untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi prediksi biaya (Kurniawan & Pramesti, 2024). Integrasi berbagai teknologi digital ini membuka peluang untuk analisis biaya yang lebih komprehensif dan prediktif (Kurniawan & Pramesti, 2024).

Metode analisis biaya lanjutan diperlukan ketika keputusan investasi tidak cukup ditopang oleh estimasi biaya awal saja. Pada tahap kelayakan finansial, indikator seperti NPV, IRR (dibanding WACC), Payback Period, dan BCR digunakan untuk menilai apakah proyek menghasilkan nilai tambah dan tingkat pengembalian yang memadai. Indikator-indikator ini membantu pemangku kepentingan membandingkan alternatif dan menetapkan batas keputusan (*go/no-go*) secara rasional berdasarkan kinerja finansial proyek.



Gambar 6. Visualisasi Terintegrasi Metode Analisis Biaya: Kelayakan Finansial, Value Engineering, Sensitivitas Risiko, dan Integrasi Digital.

Selain kelayakan, optimalisasi biaya dan pengelolaan risiko menjadi aspek penting agar keputusan lebih robust. Value Engineering menyediakan proses sistematis untuk mempertahankan fungsi sambil menurunkan biaya dan dapat dipadukan dengan LCC agar alternatif dinilai secara jangka panjang. Selanjutnya, analisis sensitivitas dan pendekatan probabilistik seperti Monte Carlo menunjukkan dampak ketidakpastian parameter kunci (misalnya CAPEX, inflasi, tingkat diskonto, efisiensi, dan harga energi) terhadap hasil finansial. Integrasi teknologi digital, seperti 4D/5D BIM, cloud, big data, dan AI dapat memperkuat akurasi estimasi dan mempercepat evaluasi skenario biaya.

# Bab 2: Konsep Nilai Waktu

## Uang dalam Analisis Teknik

---

Ade Irawaty Tolago, ST., MT.

### 2.1 Pengertian dan Prinsip Dasar Nilai Waktu Uang

#### 2.1.1 Definisi Nilai Waktu Uang

Nilai waktu uang atau *time value of money* merupakan konsep fundamental dalam analisis teknik ekonomi yang menyatakan bahwa sejumlah uang pada waktu sekarang memiliki nilai yang berbeda dengan nilai yang sama pada waktu yang akan datang. Konsep ini didasarkan pada prinsip bahwa uang memiliki kemampuan untuk menghasilkan bunga atau penghasilan, sehingga satu rupiah yang diterima hari ini bernilai lebih tinggi daripada satu rupiah yang akan diterima di masa mendatang (Oktavia et al., 2023). Nilai waktu uang mencerminkan tiga alasan mendasar mengapa uang hari ini lebih berharga daripada di masa depan: inflasi yang mengurangi daya beli, kesempatan investasi yang hilang (*opportunity cost*), dan risiko mendekat.

Dalam konteks analisis teknik, pemahaman tentang nilai waktu uang sangat penting karena sebagian besar proyek teknik melibatkan arus kas yang tersebar selama beberapa periode waktu. Seorang insinyur harus mampu membandingkan arus kas yang

terjadi pada waktu yang berbeda dengan mengkonversi semua nilai tersebut ke titik waktu yang sama, baik ke nilai sekarang atau nilai masa depan.

### **2.1.2 Komponen Utama Nilai Waktu Uang**

Terdapat beberapa komponen utama yang mempengaruhi nilai waktu uang. Pertama adalah *pokok* atau jumlah uang awal yang diinvestasikan. Kedua adalah *suku bunga* atau tingkat bunga, yang merupakan persentase pertumbuhan dari jumlah awal per periode waktu. Komponen ketiga adalah periode waktu atau jumlah tahun atau periode pembayaran yang terlibat dalam investasi (Oktavia et al., 2023). Keempat adalah *compounding*, yaitu proses perhitungan bunga atas bunga, dan kelima adalah *discounting*, yaitu proses menilai arus kas masa depan dalam nilai sekarang.

Dalam analisis teknik ekonomi, tingkat bunga atau *tingkat diskonto* menjadi parameter kunci yang menentukan seberapa besar nilai di masa depan yang akan didiskontokan menjadi nilai sekarang. Tingkat bunga ini dapat bervariasi tergantung pada risiko proyek, kondisi pasar modal, dan persyaratan pengembalian investor. Pemilihan tingkat bunga yang tepat adalah penting karena akan berdampak signifikan pada hasil evaluasi proyek.

### **2.1.3 Pentingnya Konsep Nilai Waktu Uang dalam Pengambilan Keputusan Investasi**

Konsep nilai waktu uang memiliki relevansi praktis yang sangat penting dalam pengambilan keputusan investasi teknik. Tanpa pemahaman yang baik tentang konsep ini, seorang analis dapat mengambil keputusan investasi yang tidak optimal atau

bahkan merugikan. Misalnya, ketika membandingkan dua proyek dengan total arus kas yang sama tetapi distribusi waktu yang berbeda, metode penjumlahan sederhana tanpa diskon akan memberikan hasil yang berputar.

Konsep nilai waktu uang memungkinkan para pengambil keputusan untuk membuat perbandingan yang adil antara proyek-proyek dengan profil arus kas yang berbeda, dengan mempertimbangkan kapan arus kas tersebut terjadi. Ini menjadi dasar bagi berbagai teknik evaluasi investasi seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Profitability Index*, yang semuanya menggunakan prinsip diskonto dari nilai waktu uang (Boltrk & Seker, 2023).

#### **2.1.4 Aplikasi Praktis dalam Proyek Teknik**

Dalam proyek teknik, nilai waktu uang yang diberikan untuk memberikan kelayakan finansial investasi infrastruktur, energi terbarukan, pertambangan, dan pembangunan properti. Misalnya, dalam evaluasi investasi panel surya, biaya awal yang besar dibandingkan dengan penghematan energi tahunan yang terjadi selama 20-30 tahun ke depan harus dievaluasi dengan mempertimbangkan nilai waktu uang (Hoesli & Shmygel, 2025). Tanpa konsep ini, pembuat keputusan mungkin akan salah mempertimbangkan proyek-proyek jangka panjang yang sebenarnya menguntungkan.

## 2.2 Bunga Sederhana dan Bunga Majemuk

### 2.2.1 Bunga Sederhana (*Bunga Sederhana*)

Bunga sederhana adalah bunga yang dihitung hanya pada jumlah pokok awal tanpa perhitungan bunga dari periode sebelumnya. Rumus untuk menghitung jumlah akhir dengan bunga sederhana adalah:

$$F = P + (P \times i \times n) = P(1 + i \times n)$$

di mana F adalah nilai masa depan, P adalah nilai pokok awal (*pokok*), i adalah tingkat bunga per periode, dan n adalah jumlah periode. Bunga sederhana jarang digunakan dalam analisis teknik modern karena sifatnya yang kurang realistis untuk investasi jangka panjang.

Misalnya, jika seseorang menginvestasikan Rp 10 juta dengan bunga sederhana 10% per tahun selama 3 tahun, maka nilai akhirnya adalah  $\text{Rp } 10 \text{ juta} \times (1 + 0,10 \times 3) = \text{Rp } 13 \text{ juta}$ . Perhatikan bahwa bunga yang diterima setiap tahun adalah konstan sebesar Rp 1 juta, tanpa ada penambahan dari bunga tahun sebelumnya.

### 2.2.2 Bunga Majemuk (*Bunga Majemuk*)

Bunga majemuk adalah bunga yang dihitung tidak hanya atas jumlah pokok awal, tetapi juga atas bunga yang telah dikumpulkan dari periode sebelumnya. Ini mencerminkan pertumbuhan eksponensial dari investasi. Rumus untuk menghitung nilai masa depan dengan bunga majemuk adalah:

$$F = P(1 + i)^n$$

Bunga majemuk merupakan konsep yang paling penting dalam analisis teknik ekonomi dan memberikan gambaran yang jauh lebih akurat tentang pertumbuhan nilai investasi (Ritonga et al., 2025). Dalam contoh yang sama dengan Rp 10 juta dengan bunga majemuk 10% per tahun selama 3 tahun, nilai akhirnya adalah  $Rp\ 10\ juta \times (1,10)^3 = Rp\ 13,31\ juta$ , lebih tinggi dari bunga sederhana.

### **2.2.3 Frekuensi Pembungaan (*Frekuensi Penggabungan*)**

Bunga dapat dibungakan dengan berbagai frekuensi: tahunan ( $m=1$ ), semester ( $m=2$ ), kuartalan ( $m=4$ ), bulanan ( $m=12$ ), atau bahkan kontinyu. Ketika frekuensi pembungaan lebih sering, nilai masa depan akan lebih tinggi karena bunga mendapat kesempatan untuk tumbuh lebih cepat. Rumus umum untuk pembungaan  $m$  kali per tahun selama  $n$  tahun adalah:

$$F = P(1 + i/m)^{(mn)}$$

Untuk pembungaan kontinyu, rumusnya menjadi:

$$F = P \times e^{(i \times n)}$$

di mana  $e$  adalah konstanta Euler ( $\approx 2,71828$ ). Pemahaman tentang pembungaan frekuensi penting ketika membandingkan penawaran investasi dari berbagai sumber.

### **2.2.4 Dampak Inflasi Terhadap Nilai Waktu Uang**

Inflasi memainkan peran penting dalam nilai waktu uang karena mengurangi daya beli uang dari waktu ke waktu. Untuk mengatasi inflasi digunakan konsep tingkat bunga nominal dan tingkat bunga riil. Tingkat bunga nominal adalah tingkat yang diamati di pasar, sementara tingkat bunga riil memperhitungkan inflasi. Hubungan antara keduanya diberikan oleh persamaan Fisher:

$$(1 + i_{\text{nominal}}) = (1 + i_{\text{riil}}) \times (1 + \text{tingkat\_inflasi})$$

Dalam teknik analisis, penting untuk konsistensi dalam penggunaan baik tingkat bunga nominal maupun riil, dan memastikan bahwa arus kas juga dinyatakan dalam istilah yang konsisten (baik nilai nominal atau riil) (Bullard & Gunter, 2000).

## 2.3 Nilai Sekarang dan Nilai Masa Depan

### 2.3.1 Perhitungan Nilai Masa Depan (*Nilai Masa Depan*)

Nilai masa depan (*future value* atau FV) adalah nilai yang akan dimiliki suatu investasi pada titik waktu tertentu di masa depan jika ditanamkan pada tingkat bunga tertentu. Perhitungan ini menggunakan proses *compounding* atau pembungaan. Faktor pembungaan (F/P, i%, n) yang sering dilambangkan sebagai  $(1+i)^n$  merupakan pengali yang digunakan untuk mengkonversi nilai sekarang menjadi nilai masa depan.

Untuk menghitung nilai masa depan dari sejumlah investasi P pada tingkat bunga i% per periode selama n periode:

$$F = P \times (F/P, i\%, n) = P \times (1+i)^n$$

Misalnya, jika seseorang menginvestasikan Rp 50 juta pada tingkat bunga 12% per tahun selama 5 tahun dengan pembungaan tahunan, maka nilai masa depan adalah:

$$F = \text{Rp } 50 \text{ juta} \times (1,12)^5 = \text{Rp } 50 \text{ juta} \times 1,7623 = \text{Rp } 88,12 \text{ juta}$$

Tabel nilai faktor pembungaan untuk berbagai kombinasi tingkat bunga dan periode waktu sangat berguna dalam perhitungan praktis.

### 2.3.2 Perhitungan Nilai Sekarang (*Nilai Sekarang*)

Nilai sekarang (*present value* atau PV) adalah nilai pada saat ini dari sejumlah uang yang akan diterima atau diberikan di masa depan. Ini merupakan kebalikan dari perhitungan nilai masa depan dan menggunakan proses *diskon* atau diskontoan. Faktor pendiskontoan ( $P/F$ ,  $i\%$ ,  $n$ ) yang dilambangkan sebagai  $1/(1+i)^n$  atau  $(1+i)^{-n}$  digunakan untuk mengkonversi nilai masa depan menjadi nilai sekarang.

Untuk menghitung nilai sekarang dari sejumlah uang  $F$  yang akan diterima  $n$  periode di masa depan dengan tingkat bunga  $i\%$  per periode:

$$P = F \times (P/F, i\%, n) = F / (1+i)^n = F \times (1+i)^{-n}$$

Misalnya, jika seseorang akan menerima Rp 88,12 juta lima tahun dari sekarang dan tingkat bunga yang berlaku adalah 12% per tahun, maka nilai sekarang adalah:

$$P = \text{Rp } 88,12 \text{ juta} / (1,12)^5 = \text{Rp } 88,12 \text{ juta} \times 0,5674 = \text{Rp } 50 \text{ juta}$$

Perhitungan nilai sekarang sangat penting dalam evaluasi proyek karena memungkinkan perhitungan arus kas yang terjadi pada waktu yang berbeda dengan mengkonversi semuanya ke nilai sekarang (Noerman & Faturohman, 2024).

### 2.3.3 Hubungan antara Nilai Sekarang dan Nilai Masa Depan

Nilai sekarang dan nilai masa depan memiliki hubungan yang saling berkebalikan. Jika kita mengetahui nilai sekarang, kita dapat menghitung nilai masa depan dengan pembungaan. Sebaliknya, jika kita mengetahui nilai masa depan, kita dapat

menghitung nilai sekarang dengan pendiskontoan. Hubungan ini dapat dinyatakan sebagai:

$$P = F \times (P/F, i\%, n) \text{ dan } F = P \times (F/P, i\%, n)$$

$$\text{sehingga } (P/F, i\%, n) \times (F/P, i\%, n) = 1$$

Pemahaman tentang hubungan ini membantu analisis dalam memilih pendekatan yang paling sesuai untuk masalah tertentu.

### **2.3.4 Aplikasi dalam Evaluasi Proyek**

Dalam evaluasi teknik proyek, nilai sekarang dari semua arus kas yang diharapkan dihitung untuk memastikan bahwa proyek akan memberikan pengembalian investasi yang memuaskan. Jika nilai sekarang dari semua aliran kas masuk (manfaat) dikurangi nilai sekarang dari semua aliran kas keluar (biaya) positif, maka proyek layak untuk dilaksanakan dari sudut pandang finansial (Pranoto et al., 2025).

## **2.4 Anuitas (Anuitas)**

### **2.4.1 Pengertian dan Jenis-Jenis Anuitas**

Anuitas (*anuitas*) adalah serangkaian pembayaran atau penerimaan yang sama besar yang terjadi pada interval waktu yang sama selama periode tertentu. Anuitas umum sangat penting dalam teknik analisis karena banyak proyek menghasilkan atau memerlukan arus kas yang konstan setiap tahun. Ada dua jenis anuitas utama: anuitas biasa (anuitas biasa) di mana pembayaran terjadi pada akhir setiap periode, dan anuitas jatuh tempo (anuitas jatuh tempo) di mana pembayaran terjadi pada awal setiap periode.

Pembayaran angsuran pinjaman, penerimaan sewa tahunan, dan penerimaan dividen saham yang konstan semuanya merupakan contoh anuitas. Pemahaman tentang anuitas sangat penting dalam analisis kelayakan proyek yang menghasilkan pendapatan konstan selama masa operasi.

#### **2.4.2 Nilai Masa Depan Anuitas (*Nilai Anuitas Masa Depan*)**

Nilai masa depan dari anuitas adalah nilai total dari semua pembayaran anuitas pada periode akhir, termasuk bunga yang telah terakumulasi. Untuk anuitas biasa dengan pembayaran  $A$  pada akhir setiap periode selama  $n$  periode dengan tingkat bunga  $i\%$  per periode, nilai masa depan adalah:

$$F = A \times [(1+i)^n - 1] / i = A \times (F/A, i\%, n)$$

Faktor anuitas masa depan  $(F/A, i\%, n) = [(1+i)^n - 1] / i$  merupakan pengali yang digunakan untuk menghitung nilai masa depan dari satuan anuitas.

Misalnya, jika seseorang menabung Rp 10 juta setiap akhir tahun selama 5 tahun dengan tingkat bunga 10% per tahun, maka nilai masa depan dari tabungan tersebut adalah:

$$F = \text{Rp } 10 \text{ juta} \times [(1,10)^5 - 1] / 0,10 = \text{Rp } 10 \text{ juta} \times 6,1051 = \text{Rp } 61,051 \text{ juta}$$

#### **2.4.3 Nilai Sekarang Anuitas (*Nilai Sekarang Anuitas*)**

Nilai sekarang dari anuitas adalah nilai pada waktu sekarang dari serangkaian pembayaran anuitas yang akan diterima atau diizinkan di masa depan. Untuk anuitas biasa dengan pembayaran  $A$  pada akhir setiap periode selama  $n$  periode dengan tingkat bunga  $i\%$  per periode, nilai sekarang adalah:

$$P = A \times [1 - (1+i)^{-n}] / i = A \times (P/A, i\%, n)$$

Faktor anuitas sekarang  $(P/A, i\%, n) = [1 - (1+i)^{-n}] / i$  merupakan pengali untuk menghitung nilai sekarang dari unit anuitas.

Misalnya, jika seseorang akan menerima Rp 10 juta setiap akhir tahun selama 5 tahun dan tingkat bunga adalah 10% per tahun, maka nilai sekarang dari penerimaan tersebut adalah:

$$P = \text{Rp } 10 \text{ juta} \times [1 - (1,10)^{-5}] / 0,10 = \text{Rp } 10 \text{ juta} \times 3,7908 = \text{Rp } 37,908 \text{ juta}$$

#### **2.4.4 Anuitas Perpetua dan Gradien Anuitas**

Anuitas perpetua (*perpetuity*) adalah anuitas yang terus berlangsung selamanya tanpa batas waktu. Nilai sekarang dari anuitas abadi dihitung dengan rumus sederhana:

$$P = A / i$$

Konsep ini sering digunakan dalam evaluasi aset yang diharapkan menghasilkan pendapatan selamanya, seperti tanah atau dividen saham yang konstan.

Selain anuitas konstan, terdapat juga anuitas dengan gradien (*gradient annuity*) di mana pembayaran meningkat atau menurun secara konstan dari periode ke periode. Anuitas dengan gradien aritmetika (linear) dan geometrik (eksponensial) keduanya digunakan dalam teknik analisis ketika arus kas diharapkan berubah secara sistematis.

## 2.5 Metode Evaluasi Investasi Berbasis Nilai Waktu Uang

### 2.5.1 Nilai Sekarang Bersih (*Net Present Value* - NPV)

Nilai Sekarang Bersih atau *Net Present Value* (NPV) adalah selisih antara nilai sekarang dari semua manfaat proyek dan nilai sekarang dari semua biaya proyek. NPV menunjukkan nilai tambah yang akan diperoleh jika proyek dilaksanakan. Rumus NPV adalah:

$$NPV = \sum [B_t / (1+i)^t] - \sum [C_t / (1+i)^t]$$

atau lebih sederhana:

$$NPV = \sum [CF_t / (1+i)^t]$$

di mana  $CF_t$  adalah arus kas bersih pada periode  $t$ ,  $i$  adalah tingkat bunga (tingkat diskonto), dan  $t$  adalah periode waktu (Noerman & Fatur Rahman, 2024).

Kriteria pengambilan keputusan dengan NPV adalah: jika  $NPV > 0$ , proyek layak dijalankan; jika  $NPV = 0$ , proyek tidak dapat ditentukan; jika  $NPV < 0$ , proyek sebaiknya tidak dijalankan. Keunggulan NPV adalah menggunakan nilai waktu uang secara eksplisit dan menghasilkan nilai absolut yang menunjukkan manfaat proyek finansial. Namun, NPV bergantung pada pemilihan tingkat diskonto yang tepat.

### 2.5.2 Tingkat Pengembalian Internal (*Internal Rate of Return* - IRR)

Tingkat Pengembalian Internal atau *Internal Rate of Return* (IRR) adalah tingkat bunga yang membuat nilai sekarang bersih dari semua arus kas proyek sama dengan nol. Dengan kata

lain, IRR adalah tingkat diskonto yang menyebabkan  $NPV = 0$ . Secara matematis:

$$0 = \sum [CF_t / (1+IRR)^t]$$

IRR dihitung dengan iterasi atau menggunakan metode numerik karena persamaan ini umumnya tidak dapat diselesaikan secara analitis (Pranoto et al., 2025). Kriteria pengambilan keputusan dengan IRR adalah: jika  $IRR >$  tingkat bunga pasar (hurdle rate), proyek layak dijalankan; jika  $IRR =$  tingkat rintangan, proyek indifferen; jika  $IRR <$  tingkat rintangan, proyek sebaiknya tidak dijalankan.

Keunggulan IRR adalah menghasilkan persentase pengembalian yang dimengerti dan tidak memerlukan pengetahuan sebelumnya tentang tingkat diskonto yang tepat. Namun, IRR memiliki batasan seperti kemungkinan multiple IRR pada proyek dengan arus kas yang tidak konvensional.

### **2.5.3 Indeks Profitabilitas (*Indeks Profitabilitas*)**

Indeks Profitabilitas atau *Profitability Index* (PI) adalah nilai sekarang dari manfaat proyek terhadap nilai sekarang dari biaya proyek. Rumus PI adalah:

$$PI = PV (\text{Manfaat}) / PV (\text{Biaya}) = \sum [B_t / (1+i)^t] / \sum [C_t / (1+i)^t]$$

atau dalam bentuk arus kas bersih:

$$PI = [NPV + \text{Investasi Awal}] / \text{Investasi Awal}$$

Kriteria pengambilan keputusan dengan PI adalah: jika  $PI > 1$ , proyek layak; jika  $PI = 1$ , proyek tidak dapat ditentukan; jika  $PI < 1$ , proyek sebaiknya ditolak. PI sangat berguna ketika ada batasan

modal dan harus memilih antara beberapa proyek yang saling eksklusif (Noerman & Faturrohman, 2024).

#### **2.5.4 Periode Pengembalian (*Payback Period*)**

Periode Pengembalian atau *Payback Period* (PP) adalah waktu yang diperlukan untuk mengembalikan investasi awal dari arus kas yang dihasilkan proyek. Metode ini sangat sederhana dan intuitif, tetapi tidak mempertimbangkan nilai waktu uang dalam perhitungannya. Terdapat dua varian: *simple payback period* (tanpa diskon) dan *discounted payback period* (dengan diskon).

Untuk *discounted payback period*, waktu dicari ketika nilai sekarang kumulatif dari arus kas sama dengan investasi awal. Metode ini berguna sebagai ukuran likuiditas tetapi sebaiknya digunakan bersama dengan metode lain seperti NPV atau IRR karena tidak mempertimbangkan arus kas yang terjadi setelah periode pengembalian.

## **2.6 Aplikasi Praktis dan Studi Kasus**

### **2.6.1 Evaluasi Proyek Infrastruktur**

Dalam evaluasi proyek infrastruktur seperti pembangunan jalan tol, nilai waktu uang sangat krusial. Proyek semacam ini memerlukan investasi awal yang besar tetapi menghasilkan manfaat (berupa pendapatan tol, pengurangan waktu perjalanan, pengurangan polusi) yang didistribusikan sepanjang masa operasi 20-30 tahun. Dengan menggunakan NPV dan IRR, analis dapat menentukan apakah manfaat jangka panjang ini cukup untuk

membenarkan investasi awal yang besar (Yusmin & Onaning, 2025).

### **2.6.2 Evaluasi Proyek Energi Terbarukan**

Proyek energikan terbaru seperti panel surya atau turbin angin memiliki karakteristik yang mirip dengan proyek infrastruktur. Investasi awal tinggi, tetapi biaya operasional rendah dan menghasilkan manfaat energi selama puluhan tahun. Analisis nilai waktu uang memungkinkan investor untuk menghemat energi jangka panjang dengan biaya instalasi awal dan menentukan apakah proyek layak secara finansial (Hoesli & Shmygel, 2025).

### **2.6.3 Evaluasi Investasi Pertambangan**

Dalam proyek pertambangan, periode eksplorasi dan pengembangan dapat berlangsung bertahun-tahun sebelum produksi dimulai, dan biaya operasional serta produktivitas berfluktuasi selama masa operasi. Analisis nilai waktu uang dengan metode NPV dan IRR membantu dalam memancarkan kelayakan finansial mengingat risiko dan ancaman yang tinggi dalam industri ini (Noerman & Fatur Rahman, 2024).

### **2.6.4 Analisis Sensitivitas dan Skenario**

Dalam praktiknya, asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan nilai waktu uang sering berubah. Analisis sensitivitas digunakan untuk menentukan bagaimana perubahan dalam variabel kunci (seperti tingkat bunga, arus kas, atau durasi proyek) mempengaruhi hasil evaluasi investasi. Ini membantu pembuat keputusan memahami risiko dan ketangguhan proyek dalam menghadapi perubahan kondisi.

# Bab 3: Analisis Metode

## Kelayakan Ekonomi Teknik

---

Ir. Andi Abdul Halik Lateko, Ph.D.

### 3.1 Konsep Dasar dan Pengenalan Kelayakan Ekonomi Teknik

#### 3.1.1 Definisi dan Pentingnya Analisis Kelayakan Ekonomi Teknik

Analisis kelayakan ekonomi teknik merupakan suatu metode sistematis yang digunakan untuk menganalisis apakah suatu proyek atau investasi layak dilaksanakan dari perspektif ekonomi dan teknis. Istilah *studi kelayakan* mengacu pada penelitian mendalam mengenai berbagai aspek proyek sebelum investasi besar dilakukan, sehingga risiko kegagalan dapat diminimalkan (Katlya & Widyatami, 2025). Teknik ekonomi mencakup analisis mendalam terhadap parameter-parameter finansial yang menunjukkan apakah manfaat (*benefit*) yang akan diperoleh dari suatu proyek atau investasi melebihi biaya (*cost*) yang dikeluarkan. Pentingnya analisis ini terletak pada fungsinya sebagai dasar pengambilan keputusan investasi yang rasional dan terukur, sehingga sumber daya yang terbatas dapat dipilih dengan efisien dan efektif (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025).

### **3.1.2 Tujuan dan Manfaat Analisis Kelayakan Ekonomi Teknik**

Tujuan utama dari analisis kelayakan teknik ekonomi adalah untuk memberikan informasi kuantitatif dan kualitatif kepada pengambil keputusan mengenai kelayakan suatu proyek atau investasi. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi proyek-proyek yang berpotensi memberikan keuntungan ekonomi, serta untuk membandingkan berbagai alternatif investasi sehingga dapat dipilih opsi yang optimal (Silla et al., 2025). Manfaat dari analisis kelayakan teknik ekonomi antara lain adalah: (1) memberikan dasar yang kuat untuk pengambilan keputusan investasi, (2) meminimalkan risiko keuangan dengan mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat mempengaruhi keberhasilan proyek, (3) mengoptimalkan alokasi sumber daya, dan (4) meningkatkan akuntabilitas dan transparansi dalam penggunaan dana investasi.

### **3.1.3 Komponen-Komponen Utama Analisis Kelayakan**

Analisis kelayakan teknik ekonomi pada umumnya mencakup beberapa komponen utama yang saling terintegrasi. Komponen pertama adalah aspek pasar, yang menganalisis permintaan terhadap produk atau layanan yang akan dihasilkan oleh proyek. Komponen kedua adalah aspek teknis, yang memberikan kelayakan teknis dan ketersediaan teknologi untuk melaksanakan proyek. Komponen ketiga adalah aspek finansial, yang merupakan fokus analisis utama dalam kelayakan ekonomi teknik dan melibatkan parameter-parameter perhitungan seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Payback Period* (PP), dan *Benefit-Cost Ratio* (BCR). Komponen keempat adalah aspek

manajemen dan organisasi, yang memancarkan kemampuan organisasi dalam melaksanakan proyek. Terakhir, aspek lingkungan dan sosial juga harus dipertimbangkan untuk memastikan bahwa proyek tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat.

#### **3.1.4 Tahapan Proses Analisis Kelayakan Ekonomi Teknik**

Proses analisis kelayakan ekonomi teknik biasanya dilakukan dalam beberapa tahapan yang terstruktur. Tahapan pertama adalah mengidentifikasi masalah dan membahas proyek, di mana masalah dan solusi yang ditawarkan dengan jelas. Tahapan kedua adalah pengumpulan dan analisis data, yang meliputi pengumpulan data pasar, teknis, finansial, dan sosial-lingkungan. Tahapan ketiga adalah perhitungan parameter-parameter kelayakan finansial menggunakan metode-metode yang telah ditetapkan. Tahapan keempat adalah analisis sensitivitas, yang digunakan untuk menguji pengaruh perubahan variabel-variabel penting terhadap kelayakan proyek. Tahapan terakhir adalah kesimpulan dan rekomendasi mengenai kelayakan proyek (Katlya & Widyatami, 2025).

## **3.2 Metode Nilai Sekarang Bersih (NPV)**

### **3.2.1 Konsep dan Prinsip Net Present Value**

*Net Present Value* (NPV) merupakan salah satu metode paling populer dalam analisis kelayakan ekonomi teknik yang mengukur nilai bersih dari semua aliran kas (*arus kas*) yang

diharapkan dari suatu proyek dalam nilai uang saat ini (*present value*). NPV didasarkan pada konsep *time value of money*, yang menyatakan bahwa uang yang diterima atau dikeluarkan pada waktu yang berbeda memiliki nilai yang berbeda (Silla et al., 2025). Prinsip dasar dari NPV adalah bahwa nilai uang di masa depan harus didiskonto ke nilai sekarang menggunakan tingkat diskonto tertentu (*tingkat diskonto*) yang biasanya mencerminkan tingkat pengembalian yang diinginkan atau biaya modal (*biaya modal*) dari proyek.

### 3.2.2 Rumus Perhitungan NPV

Rumus untuk menghitung NPV adalah sebagai berikut:

$$NPV = \sum [CF_t / (1 + r)^t] - I_0$$

Di mana:

- $CF_t$  = *Arus kas* pada tahun ke- $t$
- $r$  = Tingkat Diskonto (*tingkat diskonto*) atau MARR (*Tingkat Pengembalian Menarik Minimum*)
- $t$  = Tahun ke- $t$  (1, 2, 3,...,  $n$ )
- $I_0$  = Investasi awal
- $n$  = Umur proyek

Perhitungan NPV melibatkan pendiskontoan semua aliran kas di masa depan ke nilai sekarang menggunakan tingkat diskonto yang telah ditentukan, kemudian jumlah total nilai sekarang dari aliran kas masuk (*inflow*) dikurangi dengan investasi awal (Kadji et al., 2025). Hasil dari perhitungan NPV diinterpretasikan sebagai berikut: jika  $NPV > 0$ , proyek layak untuk dilaksanakan karena diharapkan menghasilkan keuntungan yang melebihi tingkat

pengembalian yang diinginkan. Jika  $NPV = 0$ , proyek berada di titik impas. Jika  $NPV < 0$ , maka proyek tidak layak untuk dilaksanakan.

### **3.2.3 Keunggulan dan Kelemahan Metode NPV**

Keunggulan dari metode NPV adalah bahwa metode ini mempertimbangkan nilai waktu uang (*time value of money*), sehingga memberikan hasil yang lebih akurat dalam profitabilitas proyek. Metode NPV juga memberikan nilai absolut dari keuntungan yang akan diperoleh dalam satuan uang, sehingga mudah dipahami dan digunakan dalam pengambilan keputusan (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Selain itu, NPV dapat digunakan untuk membandingkan berbagai alternatif investasi dan memilih alternatif yang memberikan NPV tertinggi. Kelemahan dari metode NPV adalah bahwa metode ini sensitif terhadap pemilihan tingkat diskonto. Jika tingkat diskonto tidak dipilih dengan tepat, hasil perhitungan NPV dapat menjadi berputar. Selain itu, NPV dinyatakan dalam nilai absolut, sehingga sulit untuk membandingkan proyek-proyek dengan skala investasi yang sangat berbeda.

### **3.2.4 Penerapan Praktis dan Interpretasi Hasil NPV**

Dalam praktiknya, NPV digunakan secara luas untuk mentransmisikan kelayakan berbagai jenis proyek, mulai dari proyek infrastruktur, properti, hingga proyek-proyek industri (Katlya & Widyatami, 2025). Dalam penerapannya, pemilihan tingkat diskonto sangat penting dan harus mencerminkan biaya modal dari sumber pendanaan proyek dan risiko proyek. Beberapa perusahaan menggunakan MARR (Minimum Attractive Rate of Return) sebagai

tingkat diskonto, yang biasanya ditetapkan berdasarkan tingkat pengembalian yang diinginkan dari investasi lain yang tersedia di pasar. Interpretasi hasil NPV juga harus mempertimbangkan konteks proyek, estimasi aliran kas, serta faktor-faktor non-finansial yang dapat mempengaruhi kelayakan proyek.

### **3.3 Metode Tingkat Pengembalian Internal (IRR)**

#### **3.3.1 Definisi dan Konsep IRR**

*Internal Rate of Return* (IRR) merupakan tingkat pengembalian internal dari suatu investasi atau proyek, yang didefinisikan sebagai tingkat diskonto yang membuat NPV sama dengan nol ( $NPV = 0$ ) (Silla et al., 2025). IRR merepresentasikan tingkat pengembalian tahunan yang diharapkan dari proyek, dinyatakan dalam persentase. Konsep IRR adalah bahwa IRR menunjukkan berapa persen tingkat keuntungan yang akan diperoleh dari setiap rupiah yang diinvestasikan (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Dengan kata lain, IRR adalah suku bunga (*discount rate*) yang akan membuat nilai sekarang dari aliran kas masuk sama dengan nilai sekarang dari aliran kas keluar.

#### **3.3.2 Metode Perhitungan IRR**

Perhitungan IRR tidak dapat dilakukan dengan rumus yang sederhana seperti pada NPV, melainkan memerlukan metode iterasi atau trial-and-error untuk menemukan tingkat diskonto yang

membuat  $NPV = 0$  (Kadji et al., 2025). Secara matematis, IRR dicari dengan menyelesaikan persamaan berikut:

$$0 = \sum [CF_t / (1 + IRR)^t] - I_0$$

Dalam praktiknya, perhitungan IRR dapat dilakukan dengan menggunakan kalkulator finansial atau perangkat lunak *spreadsheet* yang memiliki fungsi IRR bawaan. Metode perhitungan IRR yang umum digunakan adalah metode interpolasi linier, yang melibatkan penghitungan NPV pada dua tingkat diskonto yang berbeda, kemudian menggunakan interpolasi linier untuk menemukan IRR yang tepat.

### **3.3.3 Kriteria Penerimaan dan Penolakan Proyek**

Kriteria penerimaan atau persetujuan proyek berdasarkan metode IRR adalah dengan membandingkan nilai IRR dengan tingkat diskonto minimum yang ditetapkan (MARR). Jika  $IRR > MARR$ , proyek layak dilaksanakan karena tingkat pengembalian proyek lebih tinggi dari tingkat pengembalian minimum yang diinginkan. Jika  $IRR = MARR$ , proyek berada di titik impas. Jika  $IRR < MARR$ , proyek tidak layak dilaksanakan karena tingkat pengembalian proyek lebih rendah dari tingkat pengembalian minimum yang diinginkan (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Ketika membandingkan beberapa alternatif investasi, proyek dengan IRR tertinggi biasanya dipilih, meskipun hal ini tidak selalu benar, terutama ketika investasi awal dan usia proyek sangat berbeda.

### **3.3.4 Keunggulan dan Kelemahan Metode IRR**

Keunggulan dari metode IRR adalah bahwa metode ini memberikan hasil dalam bentuk persentase yang mudah dipahami

dan dapat langsung dibandingkan dengan tingkat pengembalian investasi alternatif yang tersedia di pasar. IRR juga mempertimbangkan nilai waktu uang dan seluruh aliran kas selama umur proyek. Kelemahan dari metode IRR adalah bahwa metode ini tidak dapat digunakan untuk membandingkan proyek-proyek dengan karakteristik aliran kas yang sangat berbeda, misalnya proyek dengan investasi awal besar versus proyek dengan investasi awal kecil (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Selain itu, IRR mungkin tidak ada atau mungkin ada lebih dari satu IRR untuk proyek-proyek yang memiliki aliran kas dengan pola tidak biasa (misalnya, terjadi beberapa kali perubahan dari aliran kas positif ke negatif).

## **3.4 Metode Payback Period dan Benefit-Cost Ratio**

### **3.4.1 Konsep dan Perhitungan Payback Period**

*Payback Period* (PP) merupakan metode analisis kelayakan yang mengukur berapa lama waktu yang diperlukan untuk mengembalikan investasi awal melalui aliran kas positif yang dihasilkan oleh proyek (Silla et al., 2025). Payback Period dihitung dengan membagi investasi awal dengan rata-rata aliran kas tahunan, atau dengan cara menjumlahkan aliran kas tahunan sampai jumlah sama dengan investasi awal. Metode ini sangat sederhana dan mudah dipahami, sehingga sering digunakan oleh praktisi dalam evaluasi awal kelayakan proyek.

### 3.4.2 Kriteria Penerimaan dan Analisis Sensitivitas

Kriteria penerimaan atau persetujuan proyek berdasarkan metode Payback Period adalah dengan membandingkan nilai Payback Period dengan umur proyek yang ditetapkan. Jika Payback Period lebih pendek dari umur proyek, proyek dianggap layak. Jika Payback Period lebih panjang dari umur proyek, proyek tidak layak (Kadji et al., 2025). Keunggulan dari metode Payback Period adalah kemudahannya dan kemudahannya dalam komunikasi kepada pihak non-teknis. Kelemahan utama adalah bahwa metode ini tidak mempertimbangkan nilai waktu uang (kecuali pada varian *discounted payback period*) dan tidak mempertimbangkan aliran kas yang terjadi setelah Payback Period tercapai.

### 3.4.3 Konsep Benefit-Cost Ratio (BCR)

*Benefit-Cost Ratio* (BCR) merupakan perbandingan antara nilai sekarang dari manfaat yang diperoleh dengan nilai sekarang dari biaya yang dikeluarkan (Katlya & Widyatami, 2025). BCR dihitung dengan rumus:

$$\text{BCR} = \text{PV (Manfaat)} / \text{PV (Biaya)}$$

Di mana PV (Benefit) adalah nilai sekarang dari semua manfaat yang diperoleh, dan PV (Cost) adalah nilai sekarang dari semua biaya yang dikeluarkan. Kriteria penerimaan atau persetujuan proyek adalah: jika  $\text{BCR} > 1$ , proyek layak dilaksanakan karena manfaat melebihi biaya. Jika  $\text{BCR} = 1$ , proyek berada di titik impas. Jika  $\text{BCR} < 1$ , proyek tidak layak.

#### **3.4.4 Aplikasi dan Keterbatasan Payback Period dan BCR**

Dalam praktiknya, metode Payback Period sering digunakan sebagai alat skrining awal untuk mengidentifikasi proyek-proyek yang memiliki periode pengembalian modal yang terlalu panjang, yang mungkin berisiko tinggi. Metode BCR sangat berguna untuk proyek-proyek yang didanai dari dana publik, karena dapat menunjukkan rasio manfaat terhadap biaya yang jelas (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Namun, keterbatasan dari kedua metode ini adalah bahwa keduanya tidak memberikan informasi yang lengkap mengenai profitabilitas proyek dan tidak dapat digunakan sendiri tanpa didukung oleh metode-metode analisis lainnya.

### **3.5 Analisis Sensitivitas dan Pengambilan Keputusan**

#### **3.5.1 Pentingnya Analisis Sensitivitas**

Analisis sensitivitas merupakan suatu teknik analisis yang digunakan untuk menguji bagaimana perubahan dalam variabel-variabel kunci (seperti investasi awal, pendapatan, biaya operasional, atau tingkat diskonto) mempengaruhi kelayakan suatu proyek yang diukur melalui parameter-parameter seperti NPV, IRR, atau BCR (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Analisis sensitivitas sangat penting karena dalam praktik, estimasi aliran kas selalu mengandung jarak dekat, dan variabel-variabel yang digunakan dalam perhitungan kelayakan mungkin tidak sesuai dengan realisasi sebenarnya.

### **3.5.2 Metode Pelaksanaan Analisis Sensitivitas**

Analisis sensitivitas dapat dilakukan dengan berbagai metode, mulai dari metode sederhana hingga metode yang lebih kompleks. Metode sederhana adalah dengan mengubah satu variabel pada satu waktu dan melihatnya pengaruhnya terhadap hasil analisis kelayakan. Metode yang lebih kompleks adalah dengan menggunakan simulasi Monte Carlo, yang melibatkan pemberian distribusi probabilitas untuk setiap variabel pencahayaan, kemudian melakukan simulasi ribuan kali untuk mendapatkan probabilitas distribusi dari hasil-hasil yang mungkin terjadi (Katlya & Widyatami, 2025). Hasil dari analisis sensitivitas dapat ditampilkan dalam bentuk tabel, grafik, atau analisis skenario yang menunjukkan berbagai skenario (optimistis, realistis, dan pesimistis).

### **3.5.3 Interpretasi Hasil Analisis Sensitivitas**

Hasil dari analisis sensitivitas digunakan untuk mengidentifikasi variabel-variabel yang paling berpengaruh terhadap kelayakan proyek. Variabel-variabel yang sangat sensitif berarti bahwa perubahan kecil dalam variabel tersebut dapat menyebabkan perubahan besar dalam hasil analisis kelayakan. Hasil analisis sensitivitas juga dapat digunakan untuk menentukan titik impas (*break even point*), yaitu nilai dari variabel tertentu di mana proyek berada pada kondisi impas ( $NPV = 0$ ) (Fajriansyah & Dwicahyani, 2025). Informasi ini sangat berguna untuk manajemen dalam memantau dan mengendalikan faktor-faktor kritis yang mempengaruhi keberhasilan proyek.

### **3.5.4 Pengambilan Keputusan Berbasis Analisis Kelayakan**

Pengambilan keputusan mengenai kelayakan suatu proyek harus didasarkan pada hasil analisis yang komprehensif yang melibatkan berbagai metode dan parameter, bukan hanya satu metode saja. Keputusan harus mempertimbangkan hasil dari analisis NPV, IRR, Payback Period, BCR, dan analisis sensitivitas secara bersama-sama (Katlya & Widyatami, 2025). Selain itu, pengambilan keputusan juga harus mempertimbangkan faktor-faktor non-finansial seperti dampak lingkungan, dampak sosial, aspek strategi, dan faktor-faktor risiko lainnya yang mungkin tidak tercermin dalam analisis finansial semata. Untuk proyek-proyek yang kompleks, penggunaan pendekatan multi-kriteria (*analisis keputusan multi-kriteria*) dapat membantu dalam mengintegrasikan berbagai faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan.

# **Bab 4: Analisis Biaya Investasi**

## **Sistem Energi Listrik**

---

**Prof. Dr. Ir. Sudirman Syam, ST., MT., IPM.**

### **4.1 Konsep Dasar Analisis Biaya Sistem Investasi Energi**

#### **4.1.1 Definisi dan Tujuan Analisis Biaya Investasi**

Analisis biaya investasi sistem energi listrik merupakan proses evaluasi komprehensif yang dirancang untuk menentukan kelayakan ekonomi dari proyek-proyek energi, baik yang menggunakan sumber terbarukan maupun konvensional. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk memberikan yang akurat dan mendalam kepada para pengambil keputusan mengenai prospek finansial dari suatu investasi energi dalam informasi jangka panjang. (Tadesse et al., 2024) Analisis ini melibatkan perhitungan menyeluruh dari semua biaya yang akan dikeluarkan selama keseluruhan siklus hidup sistem, mulai dari tahap perencanaan, perancangan, konstruksi, operasi, pemeliharaan, hingga akhirnya penonaktifan dan daur ulang peralatan.

Pentingnya analisis biaya investasi menjadi semakin penting mengingat besarnya jumlah modal yang diperlukan untuk pembangunan infrastruktur energi modern. Investasi dalam sistem energi listrik tidak hanya mempertimbangkan aspek keuangan saja,

tetapi juga harus mempertimbangkan dampak lingkungan, keinginan jangka panjang, dan manfaat sosial yang akan diperoleh masyarakat. (Galteland et al., 2025) Dengan pemahaman yang mendalam tentang dinamika biaya, para investor dan pengambil kebijakan dapat membuat keputusan yang lebih baik dan lebih menguntungkan dalam jangka panjang.

#### **4.1.2 Komponen-Komponen Biaya Dalam Sistem Energi Listrik**

Biaya total dari sistem energi listrik dapat dibagi menjadi beberapa kategori utama yang masing-masing memiliki kontribusi signifikan terhadap biaya keseluruhan. Kategori pertama adalah biaya investasi modal (*capital investment cost*), yang mencakup semua pengeluaran untuk pembelian peralatan, konstruksi infrastruktur, dan persiapan lokasi. (Galteland et al., 2025) Biaya modal ini biasanya merupakan komponen biaya terbesar dan seringkali menentukan kelayakan ekonomis suatu proyek energi.

Kategori kedua adalah biaya operasi dan pemeliharaan (*biaya operasi dan pemeliharaan*), yang terdiri dari biaya konsumsi bahan bakar (untuk sistem berbahan bakar), biaya tenaga kerja, biaya pemeliharaan rutin, dan biaya perbaikan darurat. (Le et al., 2025) Biaya operasional ini berlangsung selama seluruh masa operasional sistem energi, biasanya berkisar antara 20 hingga 40 tahun tergantung jenis teknologi yang digunakan. Kategori ketiga adalah biaya penggantian komponen (*replacement cost*), yang menjadi relevan ketika komponen tertentu seperti baterai penyimpanan energi atau turbin angin mencapai akhir dari masa hidup teknisnya dan perlu diganti.

#### **4.1.3 Metodologi Analisis Biaya Investasi**

Metodologi yang digunakan dalam analisis biaya sistem energi listrik bervariasi tergantung pada kompleksitas proyek dan tujuan analisis. Salah satu metode yang paling umum digunakan adalah *Life Cycle Cost (LCC)*, yang mengukur total biaya dari suatu sistem selama seluruh siklus hidupnya. (Galteland et al., 2025) Metode *LCC* mempertimbangkan nilai waktu uang dengan menggunakan faktor diskon untuk mengkonversi semua biaya ke nilai sekarang (*net present value, NPV*).

Metode lain yang sering digunakan adalah *Levelized Cost of Energy (LCOE)*, yang menghitung rata-rata biaya per unit energi yang dihasilkan sepanjang sistem operasional masa. (Tadesse et al., 2024) *LCOE* memberikan cara yang sederhana dan efektif untuk membandingkan berbagai teknologi energi dengan kapasitas dan karakteristik yang berbeda. Metode kedua ini saling melengkapi dan memberikan perspektif yang berbeda namun sama-sama penting dalam evaluasi kelayakan ekonomis proyek energi.

#### **4.1.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Biaya Investasi Sistem Energi**

Berbagai faktor internal dan eksternal mempengaruhi besarnya biaya investasi dalam sistem energi listrik. Faktor internal meliputi karakteristik teknis proyek seperti kapasitas terpasang, efisiensi sistem, dan kualitas komponen yang digunakan. (Priyohutomo et al., 2025) Proyek dengan kapasitas yang lebih besar umumnya memiliki biaya per unit kapasitas yang lebih rendah

karena skala ekonomi, namun memerlukan modal investasi absolut yang lebih besar.

Faktor eksternal meliputi kondisi pasar, harga bahan baku, biaya tenaga kerja, kebijakan pemerintah, dan kondisi geografis lokasi proyek. (Galteland et al., 2025) Misalnya, proyek energi surya di daerah dengan tingkat insolasi tinggi akan memiliki biaya per unit energi yang lebih rendah dibandingkan di daerah dengan insolasi rendah. Kebijakan pemerintah seperti insentif pajak, subsidi, atau *tarif umpan balik (feed-in tariff)* juga secara signifikan mempengaruhi kelayakan ekonomi suatu proyek energi terbarukan.

## **4.2 Metode Perhitungan Biaya Investasi Sistem Energi**

### **4.2.1 Komponen Biaya Modal dan Biaya Operasional**

Biaya modal suatu sistem energi listrik mencakup berbagai elemen yang harus diperhitungkan secara cermat untuk memastikan akurasi estimasi. Elemen-elemen ini termasuk biaya peralatan utama (*biaya peralatan*), biaya instalasi dan konstruksi (*biaya instalasi dan konstruksi*), biaya desain dan engineering (*biaya teknik dan desain*), serta biaya persiapan lokasi dan biaya tidak terduga (*contingency cost*). (Serat et al., 2024) Proporsi dari masing-masing elemen dapat bervariasi tergantung pada jenis sistem energi yang diinvestasikan.

Biaya operasional terdiri dari biaya tetap dan biaya variabel. Biaya tetap (*biaya tetap*) mencakup gaji karyawan operasi, asuransi, dan pemeliharaan rutin yang dilakukan terlepas dari tingkat produksi

energi. (Le et al., 2025) Biaya variabel (*variable cost*) bergantung pada tingkat produksi atau konsumsi, seperti biaya bahan bakar untuk sistem berbahan bakar konvensional atau biaya pembelian energi dari grid untuk sistem hybrid. Estimasi biaya operasional yang akurat memerlukan pemahaman mendalam tentang karakteristik operasional spesifik dari teknologi yang digunakan.

#### **4.2.2 Diskonto dan Nilai Waktu Uang**

Konsep nilai waktu uang sangat penting dalam analisis biaya sistem investasi energi karena investasi ini melibatkan pengeluaran besar pada tahap awal diikuti dengan manfaat yang diterima selama periode operasional yang panjang. (Fan et al., 2024) Diskonto (*discount rate*) digunakan untuk mengkonversi semua arus kas ke nilai sekarang (*present value*), sehingga memungkinkan perbandingan yang adil antara investasi yang memiliki pola arus kas yang berbeda sepanjang waktu.

Pemilihan tingkat diskonto merupakan salah satu keputusan analisis paling kritis dalam biaya investasi, karena nilai ini secara signifikan mempengaruhi hasil analisis. (Biancardi et al., 2026) Tingkat diskon harus mencerminkan biaya modal (*cost of capital*) dari investor, yang mungkin berbeda antara investor publik dan swasta. Investor swasta umumnya menggunakan tingkat diskonto yang lebih tinggi (8-12% atau lebih), sedangkan lembaga publik mungkin menggunakan tingkat yang lebih rendah (3-5%) untuk mencerminkan sudut pandang masyarakat yang lebih luas.

### **4.2.3 Perhitungan Net Present Value dan Internal Rate of Return**

*Net Present Value (NPV)* merupakan salah satu metrik kunci yang digunakan untuk memancarkan kelayakan ekonomi suatu proyek energi. *NPV* dihitung dengan mendiskonto semua arus kas bersih proyek ke nilai sekarang dan menjumlahkannya. (Priyohutomo et al., 2025) Proyek dengan *NPV* positif dianggap layak secara finansial, sementara proyek dengan *NPV* negatif menunjukkan bahwa investasi tidak akan memberikan return yang cukup untuk memungkinkan pengeluaran modal awal.

*Internal Rate of Return (IRR)* adalah tingkat diskonto mana *NPV* dari suatu proyek sama dengan nol. (Lamba, 2025) *IRR* memberikan indikasi tingkat pengembalian yang diharapkan dari investasi, yang dapat dibandingkan dengan tingkat diskonto atau biaya modal untuk menentukan kelayakan proyek. Proyek dengan *IRR* yang lebih tinggi dari modal biaya dianggap lebih menarik daripada yang memiliki *IRR* lebih rendah. Analisis Kombinasi *NPV* dan *IRR* memberikan pemahaman komprehensif tentang prospek finansial suatu proyek investasi energi.

### **4.2.4 Analisis Sensitivitas dan Manajemen Risiko**

Analisis sensitivitas merupakan alat penting untuk memahami bagaimana perubahan dalam parameter kunci mempengaruhi hasil analisis biaya investasi. (Priyohutomo et al., 2025) Dengan melakukan analisis sensitivitas, investor dapat mengidentifikasi variabel mana yang memiliki pengaruh terbesar

pada kelayakan proyek dan dengan demikian fokus pada mengurangi estimasi variabel tersebut.

Variabel-variabel yang biasanya dianalisis dalam analisis sensitivitas termasuk tingkat diskonto, biaya investasi modal awal, biaya operasi dan pemeliharaan, harga energi, dan tingkat pertumbuhan permintaan energi. (Serat et al., 2024) Analisis dapat dilakukan dengan mengubah satu variabel pada satu waktu (*analisis sensitivitas satu arah*) atau dengan mengubah beberapa variabel secara bersamaan (*analisis sensitivitas multi-arrah*) untuk memahami interaksi antar variabel. Hasil analisis sensitivitas membantu investor dalam merencanakan strategi manajemen risiko dan dalam menetapkan prioritas untuk penelitian lebih lanjut mengenai variabel-variabel yang tidak pasti.

## **4.3 Analisis Biaya Sistem Energi Terbarukan**

### **4.3.1 Karakteristik Biaya Sistem Energi Surya Fotovoltaik**

Sistem energi surya fotovoltaik (*fotovoltaik, PV*) telah mengalami penurunan biaya yang dramatis selama dekade terakhir, menjadikannya salah satu teknologi energi terbarukan yang paling kompetitif secara ekonomis. (Serat et al., 2024) Biaya investasi modal untuk sistem *PV* terdiri dari biaya panel surya, inverter, struktur penopang (*struktur pemasangan*), sistem monitoring, dan biaya instalasi. Biaya panel surya sendiri telah menurun lebih dari 90% dalam satu dekade terakhir karena peningkatan volume produksi dan efisiensi manufaktur.

*Levelized Cost of Energy* untuk sistem *PV* yang dipasang di tanah di lokasi dengan insolasi yang baik saat ini dapat mencapai tingkat rendah sebanding dengan atau bahkan lebih murah dari pembangkit listrik tenaga batu bara atau gas. (Virdy et al., 2025) Biaya operasi dan pemeliharaan untuk sistem *PV* relatif rendah karena tidak memiliki bagian yang bergerak, hanya memerlukan pembersihan panel secara berkala dan monitoring inverter. Estimasi *umur* panel surya telah meningkat menjadi 25-30 tahun dengan degradasi keluaran yang minimal.

#### **4.3.2 Karakteristik Biaya Sistem Energi Angin**

Sistem energi angin merupakan teknologi energi terbarukan yang telah matang dengan infrastruktur manufaktur yang mapan di berbagai belahan dunia. (Zulfaini et al., 2023) Biaya investasi modal untuk sistem energi angin terdiri dari biaya turbin angin (yang mewakili sekitar 60-70% dari total biaya modal), biaya fondasi dan struktur penopang, biaya instalasi dan transportasi, serta biaya sistem kelistrikan dan kontrol. Biaya per satuan kapasitas terpasang untuk turbin angin lepas pantai (*offshore*) secara signifikan lebih tinggi dibandingkan turbin darat (*onshore*) karena tantangan teknis dan logistik yang lebih besar.

*Levelized Cost of Energy* untuk sistem energi angin darat di lokasi dengan potensi angin yang baik dapat mencapai tingkat kompetitif dengan pembangkit listrik konvensional. (Zulfaini et al., 2023) Biaya operasi dan pemeliharaan untuk sistem angin terdiri dari inspeksi rutin, penempatan suku cadang yang aus, dan pembersihan blade. *Masa pakai* turbin angin modern diperkirakan

20-25 tahun, meskipun penelitian sedang dilakukan untuk memperpanjang masa operasional dan meningkatkan kinerja komponen utama.

#### **4.3.3 Karakteristik Pilihan Sistem Penyimpanan Energi**

Sistem penyimpanan energi, khususnya baterai ion lithium, telah mengalami penurunan biaya yang sangat cepat dan menjadi komponen penting dalam sistem energi terbarukan modern. (Colombo et al., 2025) Biaya investasi untuk sistem penyimpanan energi mencakup biaya baterai, sistem manajemen baterai (*baterai manajemen sistem, BMS*), inverter *dua arah*, dan biaya instalasi. Meskipun biaya baterai telah menurun sekitar 60-70% dalam dekade terakhir, penyimpanan energi masih menjadi salah satu komponen termahal dalam sistem energi hybrid.

Tantangan ekonomi utama dari sistem penyimpanan energi adalah ketergantungannya pada siklus charge-discharge dan degradasi kapasitas dari waktu ke waktu. (Serat et al., 2024) *Levelized Cost of Storage (LCOS)* menjadi metrik penting untuk menganalisis kelayakan sistem penyimpanan, dengan mempertimbangkan biaya investasi, biaya operasi, dan pola penggunaan sistem. Untuk sistem hybrid dengan energi terbarukan, sistem penyimpanan berfungsi untuk mengatasi ketidaksesuaian antara produksi energi dan pola permintaan beban listrik.

#### **4.3.4 Analisis Perbandingan Biaya Berbagai Teknologi Energi**

Perbandingan *Levelized Cost of Energy* dari berbagai teknologi energi memberikan gambaran komprehensif tentang posisi kompetitif dari masing-masing teknologi di pasar energi

global. (Serat et al., 2024) Hasil analisis menunjukkan bahwa energi surya fotovoltaik darat dan energi angin darat telah mencapai tingkat biaya yang kompetitif dengan pembangkit listrik berbahan bakar fosil di banyak pasar global, terutama dengan mempertimbangkan biaya eksternalitas lingkungan.

Namun, ketergantungan teknologi terbarukan pada kondisi iklim lokal dan intermittensi produksi membuat perbandingan langsung tidak sepenuhnya adil. (Lamba, 2025) Analisis yang lebih komprehensif memerlukan pertimbangan terhadap nilai sistem (system value), yaitu kontribusi teknologi energi tertentu terhadap kebohongan dan kesamaan sistem energi secara keseluruhan. Teknologi dengan kapasitas faktor tinggi dan kemampuan pemulihan cepat umumnya memiliki nilai sistem yang lebih tinggi dibandingkan teknologi dengan intermittensi tinggi.

## **4.4 Analisis Biaya Investasi Sistem Energi Hybrid dan Terintegrasi**

### **4.4.1 Konsep Sistem Energi Hybrid dan Terintegrasi**

Sistem energi hybrid menggabungkan dua atau lebih sumber energi terbarukan, penyimpanan energi, dan jaringan listrik untuk menyediakan pasokan energi yang andal dan ekonomis. (Serat et al., 2024) Integrasi berbagai sumber energi memungkinkan optimalisasi penggunaan sumber daya energi lokal dan peningkatan kinerja sistem melalui diversifikasi dan redundansi. Sistem energi terintegrasi (*sistem energi terintegrasi*) memperluas konsep ini

dengan menggabungkan sektor kelistrikan, pemanasan, pendinginan, dan transportasi untuk menciptakan sistem energi yang lebih efisien secara keseluruhan.

Keuntungan ekonomi dari sistem hybrid terutama berasal dari kemampuannya untuk mengoptimalkan operasional dari setiap komponen berdasarkan kondisi pasar, ketersediaan sumber daya, dan pola permintaan beban. (Kang et al., 2024) Penyimpanan energi dalam sistem hybrid berfungsi untuk menyeimbangkan ketidakcocokan temporal antara produksi energi variabel dan permintaan beban yang berfluktuasi, sehingga memungkinkan penetrasi energi terbarukan yang lebih tinggi tanpa mengorbankan kerahasiaan sistem.

#### **4.4.2 Optimalisasi Kapasitas dan Konfigurasi Sistem Hybrid**

Optimalisasi kapasitas dan konfigurasi komponen dalam sistem energi hybrid merupakan proses kompleks yang memerlukan pertimbangan secara simultan terhadap berbagai kriteria ekonomis dan teknis. (Kang et al., 2024) Tujuan optimalisasi biasanya adalah meminimalkan total biaya seumur hidup sistem (*life cycle cost*) sambil memenuhi batasan teknis seperti perolehan pasokan energi dan stabilitas tegangan sistem.

Model optimalisasi biasanya menggunakan pendekatan pemrograman linier atau nonlinier untuk menghasilkan ribuan kombinasi kapasitas komponen dan strategi operasional yang mungkin. (Serat et al., 2024) Perangkat lunak simulasi seperti *HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)* secara luas digunakan untuk analisis ini karena kemampuannya

dengan cepat menyediakan berbagai skenario konfigurasi sistem dan memberikan rekomendasi desain optimal berdasarkan kriteria ekonomis yang ditentukan pengguna.

#### **4.4.3 Analisis Biaya Sistem Energi Hybrid Grid-Connected dan Off-Grid**

Sistem energi hybrid yang terhubung dengan jaringan listrik utama (*grid-connected*) memiliki karakteristik ekonomis yang berbeda dari sistem off-grid karena mereka dapat mengandalkan jaringan sebagai sumber daya sekaligus sebagai beban untuk kelebihan energi. (Israr et al., 2025) Dalam sistem yang terhubung ke jaringan, penyimpanan energi dapat dioptimalkan untuk melakukan *peak shaving* dan *load shifting* untuk mendapatkan keuntungan dari perbedaan tarif listrik antara periode puncak dan lembah beban.

Sistem energi hybrid off-grid harus dirancang dengan margin kinerja yang lebih besar karena tidak dapat mengandalkan jaringan untuk pasokan darurat. (Virdy et al., 2025) Akibatnya, sistem off-grid umumnya memerlukan kapasitas penyimpanan energi yang lebih besar dan cadangan pembangkit listrik diesel untuk menjamin izin pasokan. Analisis ekonomis sistem off-grid memerlukan pertimbangan yang hati-hati terhadap biaya penyimpanan yang tinggi dan nilai kenyataan dari sumber daya lokal yang tersedia.

#### **4.4.4 Studi Kasus Analisis Biaya Sistem Energi Terintegrasi**

Berbagai studi kasus telah menunjukkan kelayakan ekonomi dari sistem energi hybrid dan terintegrasi di berbagai konteks geografis dan kondisi permintaan energi. (Kang et al., 2024) Studi

pada instalasi kampus universitas menunjukkan bahwa sistem *hybrid PV-wind-diesel-grid* dengan penyimpanan energi dapat mencapai *biaya energi* yang kompetitif dengan harga listrik dari utilitas, sambil secara signifikan mengurangi emisi karbon dan meningkatkan menjamin pasokan energi lokal.

Analisis pada sistem energi terintegrasi dengan *sektor kopling* menunjukkan bahwa integrasi sektor kelistrikan dengan kebutuhan pemanasan dan pendinginan dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan sebesar 15-25% dan mengurangi total biaya sistem sebesar 10-20% dibandingkan dengan sistem dengan sektor yang terpisah. (Kang et al., 2024) Studi ekonomi menunjukkan bahwa manfaat dari integrasi ini terutama berasal dari kemampuan untuk menggunakan *permintaan fleksibel* dari sektor pemanasan dan pendinginan untuk menyeimbangkan variabilitas produksi energi terbarukan.

## **4.5 Evaluasi dan Pemilihan Skenario Investasi Energi Listrik**

### **4.5.1 Kriteria dan Metrik untuk Evaluasi Investasi Energi**

Pemilihan teknologi energi dan konfigurasi sistem yang optimal memerlukan evaluasi berdasarkan berbagai kriteria yang mencerminkan keprihatinan berbagai *pemangku kepentingan* dalam sistem energi. (Mungra et al., 2025) Kriteria ekonomi meliputi *Net Present Value*, *Internal Rate of Return*, *Levelized Cost of Energy*, *Payback Period*, dan *Benefit-Cost Ratio*. Kriteria teknis

mencakup pasokan energi, sistem pemecahan masalah, efisiensi konversi energi, dan kemampuan untuk terintegrasi dengan infrastruktur energi yang ada.

Kriteria lingkungan dan sosial mencakup emisi karbon, dampak lingkungan lainnya, dampak sosial terhadap komunitas lokal, dan kontribusi terhadap pencapaian target energi terbarukan nasional. (Biancardi et al., 2026) Analisis multi-kriteria (*analisis multi-kriteria*) digunakan untuk mensintesis berbagai kriteria ini dan menghasilkan rekomendasi investasi yang mempertimbangkan semua dimensi kekurangan dari sistem energi.

#### **4.5.2 Analisis Skenario dan Strategi Perencanaan**

Analisis skenario memainkan peran penting dalam perencanaan sistem investasi energi di tengah-tengah tentang perkembangan masa depan seperti pertumbuhan permintaan energi, biaya teknologi, harga bahan bakar, dan kebijakan pemerintah. (Li et al., 2024) Dengan mengembangkan beberapa skenario alternatif yang mewakili berbagai asumsi tentang masa depan, investor dan pengambil kebijakan dapat mengidentifikasi strategi investasi yang kuat terhadap berbagai kondisi masa depan yang mungkin.

Skenario biasanya dibagi menjadi skenario optimis (*optimis skenario*) dengan asumsi biaya teknologi rendah dan pertumbuhan permintaan tinggi, skenario realistis (*base case skenario*) dengan asumsi moderat, dan skenario konservatif (*pessimistic skenario*) dengan asumsi biaya tinggi dan pertumbuhan permintaan rendah. (Li et al., 2024) Analisis skenario membantu investor dalam

mengidentifikasi *titik impas* dan kondisi pasar di mana investasi menjadi layak atau tidak layak secara finansial.

#### **4.5.3 Analisis Risiko dan Manajemen Ketidakpastian**

Investasi dalam sistem energi listrik yang melibatkan berbagai sumber pendek dan risiko yang harus dikelola dengan hati-hati untuk melindungi keuntungan investasi. (Goldoust et al., 2024) Risiko teknis mencakup ketergantungan pada variabel sumber daya alam (angin, surya, aliran air), kegagalan peralatan, dan kinerja sistem yang lebih rendah dari yang direncanakan. Risiko pasar mencakup fluktuasi harga energi, persaingan teknologi energi lainnya, dan perubahan dalam pola permintaan energi.

Risiko regulasi dan kebijakan mencakup perubahan dalam kebijakan subsidi energi terbarukan, perubahan tarif listrik, dan perubahan dalam target energi terbarukan nasional. (Goldoust et al., 2024) Risiko finansial mencakup lonjakan suku bunga, perubahan nilai tukar mata uang, dan kesulitan dalam pendanaan proyek. Manajemen risiko meliputi identifikasi, risiko kuantifikasi dampak finansial dari masing-masing risiko, dan pengembangan strategi mitigasi untuk mengurangi dampak negatif dari risiko yang teridentifikasi.

#### **4.5.4 Kerangka Pengambilan Keputusan Investasi**

Kerangka kerja yang mencakup pengambilan keputusan investasi dalam sistem energi listrik harus mengintegrasikan analisis teknis, ekonomi, dan risiko untuk menghasilkan rekomendasi yang kuat dan dapat diterima oleh berbagai *pemangku kepentingan*. (Mungra et al., 2025) Kerangka kerja harus jelas mendefinisikan

tujuan investasi, kriteria evaluasi yang akan digunakan, analisis metodologi yang akan diterapkan, dan proses untuk mengintegrasikan masukan dari berbagai ahli dan *pemangku kepentingan*.

Proses pengambilan keputusan harus bersifat iteratif, dengan siklus dari pengumpulan data, analisis, presentasi hasil, diskusi dengan *pemangku kepentingan*, dan penyempurnaan analisis berdasarkan masukan yang diterima. (Li et al., 2024) Transparansi dalam analisis dan kejelasan dalam komunikasi hasil analisis sangat penting untuk memastikan bahwa keputusan investasi memiliki dukungan luas dari berbagai pihak yang berkepentingan dalam sistem energi.

# Bab 5: Analisis Biaya Operasi dan Pemeliharaan

---

Prof. Dr. Ir. Machmud Effendy, ST., M.Eng.

## 5.1 Konsep Dasar Analisis Biaya Operasi

### 5.1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Biaya Operasi

Biaya operasi adalah seluruh pengeluaran yang dikeluarkan untuk menjalankan suatu sistem, peralatan, atau fasilitas selama periode operasionalnya dalam kondisi normal. Ruang lingkup biaya operasi mencakup berbagai komponen mulai dari biaya energi, biaya upah tenaga kerja, biaya bahan baku, hingga biaya utilitas yang diperlukan untuk menjaga kinerja aset. Dalam konteks manajemen aset, pemahaman yang mendalam tentang struktur biaya operasi sangat penting karena komponen ini sering kali membentuk porsi terbesar dari total biaya siklus hidup suatu aset, khususnya pada periode operasi yang panjang (Njigela & Mkilania, 2025).

Analisis biaya operasi memerlukan pendekatan sistematis yang mengidentifikasi setiap elemen biaya yang terlibat. Biaya operasi dapat dirinci menjadi biaya tetap (*biaya tetap*) yang tidak berubah seiring dengan perubahan tingkat produksi, dan biaya variabel (*biaya variabel*) yang berubah proporsional dengan tingkat aktivitas. Pemisahan ini penting karena memungkinkan manajer

untuk memahami struktur biaya dan membuat keputusan yang lebih baik terkait tingkat produksi optimal (Kandiyoh et al., 2025).

### **5.1.2 Komponen-Komponen Utama Biaya Operasi**

Komponen biaya operasional yang utama mencakup beberapa elemen penting yang harus dipantau secara berkelanjutan. Pertama adalah biaya energi (*biaya energi*) yang merupakan salah satu komponen terbesar dalam operasi banyak fasilitas industri. Kedua adalah biaya tenaga kerja (*labor cost*) yang mencakup gaji, tunjangan, dan biaya pelatihan karyawan yang terlibat dalam operasi. Ketiga adalah biaya bahan baku dan bahan penolong (*bahan baku dan perlengkapan*) yang diperlukan untuk proses produksi atau operasi (Rusmin et al., 2025).

Selain itu, biaya utilitas seperti udara, gas, dan listrik juga merupakan komponen penting yang perlu dikelola dengan efisien. Biaya logistik dan transportasi juga menjadi bagian penting dalam struktur operasional, terutama untuk perusahaan yang terlibat dalam distribusi produk dalam skala besar. Untuk sistem transportasi darat, biaya operasional meliputi biaya bahan bakar, pelumas, biaya pemeliharaan kendaraan, biaya pajak kendaraan, dan biaya asuransi yang bersama-sama membentuk struktur biaya operasional yang kompleks (Obianife et al., 2025).

### **5.1.3 Metodologi Pengumpulan Data Biaya Operasi**

Pengumpulan data biaya operasi memerlukan sistem yang terstruktur dan dapat diandalkan untuk memastikan keakuratan informasi. Sistem *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) dan *Enterprise Resource Planning* (ERP) modern

memungkinkan pencatatan otomatis dari berbagai transaksi operasional yang terjadi. Data dapat dikumpulkan dari berbagai sumber termasuk sistem akuntansi, laporan pemeliharaan, catatan konsumsi energi, dan rekam jejak penggunaan bahan (Jiao, 2025).

Metode pengumpulan data dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan, termasuk studi literatur, survei kepada praktisi industri, analisis dokumen internal perusahaan, dan wawancara dengan staf operasional yang memiliki pengetahuan mendalam tentang proses operasional. Data historis dari periode sebelumnya juga sangat berharga untuk mengidentifikasi tren dan pola biaya operasi. Untuk memastikan data terjamin, proses validasi dan verifikasi harus dilakukan dengan cermat (Njigela & Mkilania, 2025).

#### **5.1.4 Analisis Tren Biaya Operasi Jangka Panjang**

Analisis tren biaya operasi dalam jangka panjang memungkinkan organisasi untuk mengidentifikasi pola-pola perubahan biaya dan membuat proyeksi untuk perencanaan anggaran masa depan. Tren yang diamati dapat mencerminkan dampak dari perubahan teknologi, inflasi, perubahan peraturan pemerintah, atau transformasi dalam proses operasional. Penggunaan teknik analisis statistik seperti regresi linier, analisis deret waktu (*time series analysis*), dan penyesuaian inflasi membantu dalam memahami tren biaya dengan lebih akurat (Obianife et al., 2025).

Pengalaman industri menunjukkan bahwa biaya operasi cenderung meningkat seiring dengan waktu, namun pengurangan biaya dapat dicapai melalui penerapan teknologi yang lebih efisien,

peningkatan proses operasional, dan optimalisasi penggunaan sumber daya. Implementasi sistem *Total Productive Maintenance* (TPM) dan *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) telah terbukti dapat mengurangi biaya operasi secara signifikan, dengan peningkatan efisiensi operasional mencapai 12-35% dan pengurangan biaya pemeliharaan sebesar 10-30% (Ilham & Mainil, 2025).

## **5.2 Analisis Biaya Pemeliharaan Preventif**

### **5.2.1 Konsep dan Prinsip Pemeliharaan Preventif**

*Pemeliharaan preventif* (preventive maintenance) adalah serangkaian pemeliharaan aktivitas yang dirancang untuk mencegah terjadinya kerusakan peralatan dengan melakukan perawatan rutin pada interval waktu atau penggunaan yang telah ditentukan. Prinsip dasar pemeliharaan preventif adalah bahwa mencegah kerusakan jauh lebih ekonomis daripada memperbaiki kerusakan setelah terjadi. Melalui pemeliharaan preventif yang terencana dengan baik, organisasi dapat mengurangi waktu henti (*downtime*) yang tidak direncanakan, memperpanjang umur aset, dan menurunkan total biaya pemeliharaan dalam jangka panjang (ElKasrawy et al., 2024).

Pemeliharaan preventif dapat dilakukan berdasarkan beberapa kriteria, termasuk pemeliharaan berbasis waktu (*time-based maintenance*) yang dilakukan pada interval waktu yang tetap, pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) yang dilakukan berdasarkan kondisi aktual peralatan, dan pemeliharaan

berbasis penggunaan (*usage-based maintenance*) yang dilakukan berdasarkan jumlah jam operasi atau siklus penggunaan. Setiap pendekatan memiliki kelebihan dan kekurangan yang harus dievaluasi berdasarkan karakteristik spesifik dari aset yang dirawat (Blokus-Dziula et al., 2023).

### **5.2.2 Model Biaya Pemeliharaan Preventif**

Pengembangan model biaya pemeliharaan preventif memerlukan pemahaman tentang hubungan antara frekuensi pemeliharaan, biaya pemeliharaan per satuan, dan total biaya kegagalan (*biaya kegagalan*). Biaya kegagalan mencakup biaya perbaikan darurat, biaya kehilangan produksi, biaya penggantian suku cadang dalam kondisi darurat, dan biaya lain yang timbul akibat kerusakan mendadak. Model optimasi dapat dikembangkan untuk menemukan interval pemeliharaan yang meminimalkan total biaya, yaitu penjumlahan dari biaya pemeliharaan rutin dan biaya kegagalan (Njigela & Mkilania, 2025).

Model *Reliability Centered Maintenance* (RCM) merupakan pendekatan sistematis untuk menentukan strategi pemeliharaan yang paling efektif dan hemat biaya. RCM mengidentifikasi modus kegagalan (*failure mode*) yang paling kritis berdasarkan *analisis Failure Mode Effect and Criticality Analysis* (FMECA), dan kemudian menentukan strategi pemeliharaan yang paling sesuai untuk setiap komponen. Pendekatan ini telah terbukti mengurangi biaya pemeliharaan sebesar 12-30% sambil meningkatkan efisiensi sistem (Oskouei et al., 2024).

### 5.2.3 Strategi Pemeliharaan Berbasis Kondisi

Pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*, CBM) menggunakan pemantauan kondisi secara real-time untuk menentukan kapan pemeliharaan seharusnya dilakukan. Teknologi sensor dan sistem monitoring memungkinkan pengumpulan data yang berkelanjutan tentang kondisi operasional peralatan, seperti getaran, suhu, tekanan, dan parameter operasional lainnya. Data ini kemudian dianalisis menggunakan algoritma *pembelajaran mesin* dan analisis statistik untuk memprediksi sisa umur berguna (*sisa umur manfaat*, RUL) dari komponen (Nie et al., 2025).

Keuntungan dari pemeliharaan berdasarkan kondisi adalah bahwa pemeliharaan hanya dilakukan ketika benar-benar diperlukan, sehingga menghindari pemeliharaan yang tidak perlu pada peralatan yang masih dalam kondisi baik. Pendekatan ini dapat menghemat biaya hingga 30-40% dibandingkan dengan pemeliharaan preventif berbasis waktu yang tradisional, sambil meningkatkan ketersediaan peralatan. Teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *big data analitik* memungkinkan penerapan pemantauan kondisi dalam skala besar dengan efisiensi yang lebih tinggi (Setiawan et al., 2025).

### 5.2.4 Optimalisasi Interval Pemeliharaan

Optimalisasi interval pemeliharaan merupakan proses penentuan jadwal pemeliharaan yang meminimalkan total biaya sambil mempertahankan tingkat resolusi yang dapat diterima. Proses optimalisasi memerlukan analisis mendalam tentang pola kegagalan

peralatan, biaya pemeliharaan, dan biaya kegagalan yang terkait. Teknik *pemrograman dinamis* dan optimasi optimasi lainnya dapat digunakan untuk menemukan solusi optimal (Chen et al., 2023).

Model optimasi interval pemeliharaan harus mempertimbangkan berbagai faktor seperti umur peralatan, kondisi operasional, beban kerja, dan lingkungan operasi. Penelitian menunjukkan bahwa interval pemeliharaan yang optimal sering kali bervariasi sepanjang masa operasional aset, dengan interval yang lebih pendek pada tahap awal dan akhir umur peralatan. Implementasi optimasi interval pemeliharaan dapat mengurangi biaya operasi sebesar 15-25% tanpa pengorbanan (Kamariotis et al., 2023).

## **5.3 Pemeliharaan Prediktif dan Teknologi Monitoring**

### **5.3.1 Dasar-Dasar Pemeliharaan Prediktif**

Pemeliharaan prediktif (*pemeliharaan prediktif*, PdM) memanfaatkan teknologi sensor, data analitik, dan mesin pembelajaran untuk memprediksi kapan peralatan akan gagal sebelum kegagalan itu terjadi. Pendekatan ini memungkinkan organisasi untuk merencanakan pemeliharaan dengan cermat, mengoptimalkan penggunaan sumber daya pemeliharaan, dan menghindari hentinya produksi yang tidak terduga. Teknologi pemeliharaan prediktif telah berkembang pesat dengan tersedianya

sensor yang lebih terjangkau, komputasi *cloud*, dan *pembelajaran mesin* algoritma yang canggih (Chaudhari, 2025).

Pemeliharaan prediktif bergantung pada pengumpulan dan analisis data historis tentang pola kegagalan peralatan, kondisi operasional pada saat kegagalan terjadi, dan hasil tindakan pemeliharaan sebelumnya. Data ini digunakan untuk melatih model pembelajaran mesin yang dapat memprediksi kapan kegagalan akan terjadi dengan akurasi yang semakin baik seiring waktu. Model yang baik dapat mencapai akurasi prediksi 85-95% untuk banyak jenis peralatan (Bhatia, 2025).

### **5.3.2 Implementasi Sistem Monitoring Secara Real-Time**

Sistem monitoring real-time mengumpulkan data dari berbagai sensor yang dipasang pada peralatan penting untuk menjaga kondisi operasional secara berkelanjutan. Data dapat mencakup parameter fisik seperti suhu, getaran, tekanan, arus listrik, dan berbagai parameter operasional lainnya yang relevan dengan jenis peralatan. Data yang dikumpulkan dikirim ke sistem analitik pusat melalui jaringan komunikasi untuk diproses dan dianalisis (Jiao, 2025).

Platform monitoring real-time modern yang mengintegrasikan berbagai teknologi termasuk *Internet of Things* (IoT), *cloud computing*, dan analitik data besar (*big data analitik*) untuk memberikan wawasan yang komprehensif tentang kondisi aset. Implementasi sistem ini dapat meningkatkan ketersediaan peralatan sebesar 10-20% dan mengurangi biaya pemeliharaan darurat sebesar 30-50% (Setiawan et al., 2025).

Keberhasilan implementasi memerlukan investasi dalam infrastruktur teknologi, pelatihan personel, dan prosedur operasional pengembangan yang sesuai.

### **5.3.3 Algoritma Machine Learning untuk Prediksi Kegagalan**

Algoritma mesin pembelajaran yang digunakan dalam pemeliharaan prediktif mencakup berbagai pendekatan, mulai dari metode klasifikasi sederhana hingga jaringan saraf dalam (*deep learning*) yang kompleks. Algoritma umum yang digunakan termasuk *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), *Long Short-Term Memory* (LSTM), dan kombinasi ansambel dari berbagai algoritma. Setiap algoritma memiliki kekuatan dan kelemahan yang perlu dievaluasi berdasarkan karakteristik data spesifik dan masalah prediksi (Kapoor et al., 2025).

Proses pengembangan model mesin pembelajaran meliputi beberapa tahap, termasuk pengumpulan data, pembersihan dan persiapan data, pemilihan *fitur* (*feature Selection*), model pelatihan, validasi, dan deployment. Model harus divalidasi menggunakan data independen yang berbeda dari data pelatihan untuk memastikan generalisasi yang baik. Dalam praktiknya, model pembelajaran mesin untuk prediksi sisa umur berguna telah mencapai akurasi 85-95% dengan menggunakan arsitektur *Convolutional Neural Networks* (CNN) atau *LSTM* yang dikombinasikan dengan teknik *mekanisme perhatian* (Zcan & Kutbay, 2024).

### **5.3.4 Integrasi Prediktif Maintenance dengan Manajemen Inventory Spare Parts**

Integrasi antara sistem pemeliharaan prediktif dan manajemen persediaan suku cadang memungkinkan pengisian suku cadang yang optimal berdasarkan prediksi kebutuhan. Sistem yang terintegrasi dengan baik dapat mengurangi stok *mati persediaan* yang tidak perlu, menghindari kekurangan suku cadang pada saat kritis, dan mengoptimalkan alokasi dana untuk pembelian suku cadang. Model yang menggunakan *pembelajaran penguatan multi-agen* telah terbukti meningkatkan efisiensi manajemen persediaan sebesar 25-35% (Nie et al., 2025).

Sistem manajemen persediaan adaptif menggunakan prediksi probabilistik dari sisa umur berguna untuk menghitung tingkat stok yang optimal secara dinamis. Pendekatan ini mempertimbangkan risiko kehabisan stok (*stockout risk*), biaya penyimpanan persediaan, dan biaya rush order dalam menentukan tingkat stok yang optimal. Implementasi sistem ini pada industri manufaktur modern telah menghasilkan pengurangan rata-rata persediaan sebesar 25% sambil mempertahankan tingkat ketersediaan suku cadang di atas 98% (Kuznetsova & Shcheglov, 2025).

## **5.4 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCCA)**

### **5.4.1 Definisi dan Metodologi LCCA**

*Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) adalah metodologi evaluasi ekonomi yang komprehensif untuk menghitung total biaya

kepemilikan suatu aset sepanjang siklus hidupnya. LCCA mempertimbangkan semua biaya yang terkait dengan aset, mulai dari tahap perencanaan dan desain, akuisisi, operasi, pemeliharaan, hingga penghapusan dan daur ulang pada akhir umur aset. Pendekatan holistik ini memberikan gambaran yang lebih akurat tentang kekuatan finansial jangka panjang dari keputusan pembelian aset dibandingkan dengan hanya mempertimbangkan biaya awal (Njigela & Mkilania, 2025).

Metodologi LCCA meliputi beberapa langkah utama, termasuk definisi alternatif yang akan dianalisis, identifikasi dan estimasi semua biaya komponen, penentuan periode analisis, penentuan tingkat diskonto, perhitungan analisis nilai sekarang neto dari setiap alternatif, dan sensitivitas untuk menguji ketahanan hasil terhadap perubahan asumsi. Persamaan dasar LCCA adalah menghitung *Net Present Value* (NPV) sebagai penjumlahan dari semua biaya yang didiskonto ke tahun analisis dasar (Kandiyoh et al., 2025).

#### **5.4.2 Komponen Biaya dalam LCCA**

Komponen-komponen biaya yang dimasukkan dalam analisis LCCA dapat dibagi menjadi beberapa kategori utama. Pertama adalah biaya awal atau biaya akuisisi (*acquisition cost* atau *initial cost*) yang mencakup harga pembelian aset, biaya instalasi, dan biaya pengujian awal. Kedua adalah biaya operasi (*biaya operasional*) yang mencakup biaya energi, biaya bahan bakar, dan biaya utilitas lainnya yang diperlukan untuk menjalankan aset (Setiawan et al., 2025).

Ketiga adalah biaya pemeliharaan dan perbaikan (*maintenance and repair cost*) yang mencakup biaya pemeliharaan preventif rutin, biaya perbaikan darurat, dan biaya penggantian komponen. Keempat adalah biaya penyimpanan dan penanganan suku cadang (*biaya penyimpanan suku cadang*), biaya kalibrasi dan pengujian (*biaya kalibrasi dan pengujian*), dan biaya pelatihan personel yang mengoperasikan dan memelihara aset. Kelima adalah biaya penghapusan atau nilai sisa, yaitu nilai sisa aset atau biaya yang terkait dengan penghapusan aset pada akhir umurnya (Rusmin et al., 2025).

#### **5.4.3 Teknik Diskonto dan Perhitungan Nilai Sekarang**

Teknik diskonto dalam LCCA mempertimbangkan nilai waktu dari uang, mengakui bahwa sejumlah uang yang sama pada waktu yang berbeda memiliki nilai yang berbeda. Nilai sekarang neto (NPV) dari arus kas di masa depan dihitung menggunakan persamaan diskonto standar dengan tingkat diskonto yang sesuai dengan tingkat pengembalian yang diharapkan atau biaya modal organisasi. Tingkat diskonto yang dipilih secara signifikan mempengaruhi hasil LCCA, khususnya untuk aset dengan masa operasi yang panjang (Njigela & Mkilania, 2025).

Proses perhitungan NPV melibatkan estimasi aliran kas untuk setiap tahun selama periode analisis, kemudian mendiskonto setiap aliran kas menggunakan faktor diskonto yang dihitung sebagai  $1/(1+r)^n$ , di mana  $r$  adalah diskon tingkat dan  $n$  adalah tahun ke depan. Analisis sensitivitas harus dilakukan untuk menguji bagaimana perubahan dalam asumsi kunci seperti tingkat diskonto,

umur aset, dan biaya operasi mempengaruhi hasil analisis. Penelitian menunjukkan bahwa hasil LCCA dapat berubah secara signifikan ketika tingkat diskonto berubah, memerlukan pemilihan tingkat diskonto yang cermat dan transparan (Kandiyoh et al., 2025).

#### **5.4.4 Studi Kasus dan Aplikasi Praktis LCCA**

Aplikasi praktis LCCA telah diterapkan dalam berbagai industri dan jenis aset. Dalam industri transportasi, LCCA digunakan untuk membandingkan antara kendaraan berbahan bakar fosil dengan kendaraan listrik, dengan mempertimbangkan biaya pembelian yang lebih tinggi dari kendaraan listrik tetapi biaya operasi dan pemeliharaan yang lebih rendah. Dalam infrastruktur industri, LCCA digunakan untuk membandingkan strategi pemeliharaan jalan yang berbeda, menentukan kapan harus melakukan pemeliharaan preventif versus pemeliharaan reaktif (Shakya et al., 2025).

Dalam bangunan industri, LCCA membantu dalam pemilihan sistem bangunan yang optimal, misalnya membandingkan sistem pencahayaan tradisional dengan sistem LED yang lebih hemat energi, atau sistem pemanas yang berbeda. Hasil dari berbagai studi kasus menunjukkan bahwa analisis LCCA sering kali mengungkapkan bahwa alternatif dengan biaya awal lebih tinggi tetapi biaya operasi lebih rendah seringkali memiliki total biaya siklus hidup yang lebih rendah dibandingkan dengan alternatif dengan biaya awal rendah. Implementasi rekomendasi dari LCCA dapat menghasilkan penghematan biaya sebesar 15-40% selama umur aset (Setiawan et al., 2025).

## **5.5 Optimalisasi Biaya dan Strategi Penghematan**

### **5.5.1 Identifikasi Biaya Utama Pengemudi**

Identifikasi driver biaya utama (*cost driver*) adalah langkah penting dalam upaya optimalisasi biaya operasi dan pemeliharaan. *Cost driver* merupakan faktor-faktor yang secara signifikan mempengaruhi besarnya biaya yang dikeluarkan. Pendekatan *Activity-Based Costing* (ABC) dapat digunakan untuk mengidentifikasi driver biaya dengan menganalisis aktivitas yang mengonsumsi sumber daya dan mengalokasikan biaya berdasarkan konsumsi aktivitas driver (Obianife et al., 2025).

Studi analitik menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) dan teknik statistik lainnya dapat membantu dalam mengidentifikasi biaya driver yang paling signifikan dari sejumlah faktor besar potensial. Misalnya, dalam industri transportasi darat, analisis identifikasi bahwa gaji pengemudi, biaya pemeliharaan kendaraan, biaya bahan bakar, dan biaya pemenuhannya regulasi merupakan biaya pengemudi utama yang bersama-sama membentuk lebih dari 80% dari total biaya operasional (Obianife et al., 2025).

### **5.5.2 Strategi Pengurangan Biaya Operasi**

Pengurangan biaya operasional dapat dicapai melalui berbagai strategi yang melibatkan peningkatan efisiensi operasional, optimalisasi penggunaan sumber daya, dan penerapan teknologi yang lebih efisien. Salah satu strateginya adalah penerapan *Total Productive Maintenance* (TPM) yang mengintegrasikan

pemeliharaan preventif dengan optimalisasi operasional dan peningkatan kualitas produk. TPM melibatkan seluruh organisasi, mulai dari manajemen puncak hingga operator lapangan, untuk mencapai tujuan peningkatan efisiensi (Ilham & Mainil, 2025).

Strategi lain termasuk optimalisasi konsumsi energi melalui penggunaan peralatan yang lebih efisien, penjadwalan operasi yang optimal, dan pengaturan ulang alur proses. Penggunaan teknologi otomasi dan sistem kontrol cerdas dapat mengurangi konsumsi energi sebesar 10-30%. Implementasi program pengurangan limbah dan daur ulang dapat mengurangi biaya pembuangan limbah dan bahan baku yang digunakan. Pelatihan dan pengembangan personel juga penting untuk meningkatkan kesadaran tentang efisiensi biaya dan mendorong kontribusi dari setiap individu dalam organisasi (Lawoyin et al., 2023).

### **5.5.3 Implementasi Sistem Manajemen Aset dan Teknologi Digital**

Implementasi sistem manajemen aset digital dan teknologi modern memungkinkan organisasi untuk mengoptimalkan penggunaan aset, mengurangi downtime yang tidak diperlukan, dan membuat keputusan informasi manajemen yang lebih baik berdasarkan data real-time. Sistem *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) memfasilitasi perencanaan pemeliharaan yang lebih baik, pelacakan biaya pemeliharaan, dan analisis tren biaya. Integrasi CMMS dengan sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) memberikan visibilitas yang komprehensif tentang biaya aset di seluruh organisasi (Jiao, 2025).

Teknologi *Internet of Things* (IoT), *cloud computing*, dan analitik data besar (*big data*) memungkinkan pemantauan kondisi aset yang lebih baik, prediksi kegagalan yang lebih akurat, dan optimalisasi pemeliharaan jadwal. Organisasi yang telah mengimplementasikan teknologi ini melaporkan peningkatan ketersediaan aset sebesar 10-25%, pengurangan biaya pemeliharaan sebesar 15-30%, dan peningkatan produktivitas sebesar 10-20% (Nagy et al., 2025).

#### **5.5.4 Manajemen Kontrak dengan Vendor dan Pemasok**

Manajemen kontrak yang efektif dengan pemeliharaan vendor dan pemasok suku cadang merupakan elemen penting dalam optimalisasi biaya pemeliharaan. Negosiasi kontrak yang baik dapat menghasilkan pengurangan harga suku cadang, biaya pemeliharaan preventif yang lebih kompetitif, dan tingkat respon yang lebih baik untuk panggilan pemeliharaan darurat. Penggunaan sistem *request for proposal* (RFP) yang terjamin memastikan transparansi dan transparansi yang adil antar vendor (Njigela & Mkilania, 2025).

Penerapan strategi *total biaya kepemilikan* (TCO) dalam evaluasi vendor memastikan bahwa keputusan didasarkan tidak hanya pada harga, tetapi juga pada kualitas layanan, akurasi, dan dampak jangka panjang pada biaya operasi. Strategi kemitraan program dengan kunci vendor dapat menghasilkan inovasi dalam layanan pemeliharaan, akses ke teknologi terbaru, dan penurunan biaya melalui peningkatan volume. Beberapa organisasi telah berhasil mencapai pengurangan biaya pemeliharaan sebesar 20-30%

melalui manajemen kontrak vendor yang efektif (Ameeri et al., 2023).

# Bab 6: *Break-Even* dan Sensitivitas

---

Dr. Ir. Muhammad Yusan Naim, MSc.

## 6.1 Konsep Dasar Titik Impas

### 6.1.1 Pengertian Titik Impas

*Break-Even Point* (BEP) atau titik impas adalah suatu kondisi ketika perusahaan tidak mengalami keuntungan maupun kerugian. Secara teknis, *titik impas* adalah situasi di mana total pendapatan sama dengan total biaya (baik biaya tetap maupun biaya variabel), sehingga laba bersih menjadi nol. Konsep ini merupakan salah satu alat manajemen keuangan yang paling penting dalam perencanaan laba jangka pendek, karena membantu manajemen memahami hubungan antara biaya, volume produksi, dan keuntungan yang akan diperoleh perusahaan.

*Titik impas* sangat penting bagi pengambilan keputusan bisnis karena memberikan informasi tentang volume penjualan atau produksi minimum yang harus dicapai agar perusahaan tidak mengalami kerugian. Dalam konteks analisis *cost-volume-profit* (CVP), *break-even point* menjadi dasar untuk menganalisis berbagai skenario bisnis dan membantu manajemen dalam menetapkan target penjualan yang realistis. Pemahaman mendalam tentang *titik impas* memungkinkan perusahaan untuk merencanakan

strategi harga yang lebih baik, mengendalikan biaya secara lebih efektif, dan mengidentifikasi tingkat risiko bisnis yang dihadapi.

### **6.1.2 Pentingnya Analisis Titik Impas dalam Manajemen Bisnis**

Analisis *titik impas* memiliki peran yang sangat signifikan dalam manajemen bisnis modern, terutama dalam pengambilan keputusan strategi jangka pendek. Penelitian empiris menunjukkan bahwa perusahaan yang secara konsisten melakukan analisis *titik impas* memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan perusahaan yang tidak melakukan analisis ini. Hal ini menunjukkan bahwa *analisis titik impas* bukan hanya alat teoritis, tetapi memiliki dampak praktis yang nyata terhadap kesuksesan bisnis.

Pentingnya *analisis titik impas* dalam manajemen bisnis terletak pada kemampuannya untuk menyediakan informasi yang berguna bagi berbagai aspek manajemen. Pertama, analisis ini membantu dalam perencanaan laba dengan menentukan tingkat penjualan yang diperlukan untuk mencapai target laba tertentu. Kedua, analisis ini membantu dalam pengambilan keputusan harga dengan memberikan pemahaman tentang hubungan antara harga, volume, dan keuntungan. Ketiga, analisis ini membantu dalam pengendalian biaya dengan mengidentifikasi struktur biaya perusahaan dan peluang untuk meningkatkan efisiensi. Keempat, analisis ini membantu dalam manajemen risiko dengan memberikan gambaran tentang margin keamanan (*margin of safety*) yang dimiliki perusahaan.

### 6.1.3 Komponen-Komponen Analisis Titik Impas

Analisis *titik impas* terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terkait dan harus dipahami secara menyeluruh. Komponen pertama adalah biaya tetap (*fixed cost*), yaitu biaya yang tidak berubah seiring dengan perubahan volume produksi. Contoh biaya tetap termasuk gaji karyawan, sewa kantor, asuransi, dan depresiasi mesin. Komponen kedua adalah biaya variabel (*variable cost*), yaitu biaya yang berubah seiring dengan perubahan volume produksi. Contoh biaya variabel termasuk bahan baku, kemasan, dan upah tenaga kerja yang dibayar berdasarkan produksi.

Komponen ketiga adalah harga jual per unit (*harga jual per unit*), yang merupakan harga yang dikenakan perusahaan untuk setiap unit produk yang dijual. Komponen keempat adalah *margin kontribusi*, yaitu selisih antara harga jual per unit dengan variabel biaya per unit. *Margin kontribusi* mewakili kontribusi setiap unit penjualan terhadap penutupan biaya tetap dan penghasilan laba. Komponen kelima adalah rasio *margin kontribusi*, yang merupakan persentase *margin kontribusi* dari harga jual per unit, memberikan gambaran tentang seberapa besar kontribusi setiap rupiah penjualan terhadap penutupan biaya tetap dan laba.

### 6.1.4 Rumus dan Metode Perhitungan Titik Impas

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung *titik impas*, masing-masing dengan keunggulan dan keterangan yang berbeda. Metode pertama adalah metode persamaan, dimana *titik impas* dihitung dengan menggunakan persamaan dasar: Total Pendapatan = Total Biaya. Rumus untuk

persamaan metode ini adalah  $BEP (unit) = \frac{\text{Biaya Tetap}}{(\text{Harga Jual per Unit} - \text{Biaya Variabel per Unit})}$ , atau  $BEP (rupiah) = \frac{\text{Biaya Tetap}}{\text{Rasio Contribution Margin}}$ .

Metode kedua adalah metode *margin kontribusi*, yang menekankan peran penting *margin kontribusi* dalam perhitungan *titik impas*. Dalam metode ini, *titik impas* dihitung dengan membagi total biaya tetap dengan *margin kontribusi* per unit atau rasio *margin kontribusi*. Metode ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana setiap unit penjualan berkontribusi terhadap penutupan biaya tetap. Metode ketiga adalah metode grafis, di mana hubungan antara volume, biaya, dan laba dijelaskan dalam bentuk grafis. Grafik menunjukkan garis total pendapatan, garis total biaya, dan titik di mana kedua garis berpotongan merupakan *titik impas*. Meskipun metode grafis lebih visual dan mudah dipahami, metode ini kurang presisi untuk perhitungan yang akurat.

## 6.2 Analisis Biaya-Volume-Laba (CVP)

### 6.2.1 Kerangka Kerja Analisis Biaya-Volume-Laba

*Analisis Cost-Volume-Profit* (CVP) adalah kerangka kerja analitik yang komprehensif untuk memahami hubungan antara biaya, volume produksi, dan keuntungan perusahaan. Analisis CVP memperluas konsep *titik impas* dengan memberikan pemahaman yang lebih luas tentang bagaimana perubahan dalam biaya, harga, dan volume penjualan akan mempengaruhi keuntungan perusahaan. Kerangka kerja analisis CVP meliputi analisis sistematis terhadap

struktur biaya perusahaan, mengidentifikasi variabel biaya tetap dan biaya, dan menggunakan informasi ini untuk membuat prediksi tentang keuntungan pada berbagai tingkat penjualan.

Kerangka kerja analisis CVP didasarkan pada beberapa asumsi dasar yang penting untuk dipahami. Asumsi pertama adalah bahwa semua biaya dapat diklasifikasikan sebagai biaya tetap atau biaya variabel, tidak ada biaya campuran. Dalam praktiknya, asumsi ini mungkin tidak sepenuhnya akurat karena adanya biaya semi-variabel, namun untuk keperluan analisis, biaya semi-variabel dapat dikecualikan menjadi komponen biaya tetap dan variabel menggunakan metode tertentu seperti metode regresi atau metode tinggi-rendah. Asumsi kedua adalah bahwa harga jual per unit tetap konstan di seluruh tingkat volume penjualan. Asumsi ketiga adalah bahwa struktur biaya tetap tidak berubah dalam jangka waktu analisis. Asumsi keempat adalah bahwa volume penjualan adalah satu-satunya faktor yang mempengaruhi biaya dan pendapatan, mengabaikan faktor-faktor lain seperti perubahan teknologi atau preferensi konsumen.

### **6.2.2 Kontribusi Margin dan Rasio Kontribusi**

*Contribution margin* (margin kontribusi) adalah konsep kunci dalam analisis CVP yang merepresentasikan jumlah rupiah dari setiap penjualan yang tersedia untuk biaya penutupan tetap dan menghasilkan keuntungan. *Margin kontribusi* dihitung dengan mengurangi biaya variabel per unit dari harga jual per unit. Konsep ini sangat penting karena menunjukkan seberapa efisien perusahaan

dalam menggunakan pendapatan untuk menutup biaya tetap dan menghasilkan laba.

*Rasio margin kontribusi* (rasio margin kontribusi) adalah persentase *margin kontribusi* dari harga jual per unit, yang menunjukkan proporsi setiap rupiah penjualan yang tersedia untuk menutup biaya tetap dan laba. Rasio ini dihitung dengan membagi *margin kontribusi* per unit dengan harga jual per unit, atau dengan membagi total *margin kontribusi* dengan total penjualan. Rasio kontribusi margin yang lebih tinggi menunjukkan bahwa proporsi yang lebih besar dari setiap rupiah penjualan tersedia untuk menutup biaya tetap dan menghasilkan laba, yang berarti perusahaan memiliki struktur biaya yang lebih efisien. Rasio ini sangat berguna dalam analisis sensitivitas karena memungkinkan perusahaan memprediksi dampak perubahan volume penjualan terhadap keuntungan.

### **6.2.3 Penerapan CVP dalam Perencanaan Laba**

Aplikasi analisis CVP dalam perencanaan laba memungkinkan manajemen untuk menentukan tingkat penjualan yang diperlukan untuk mencapai target laba tertentu. Manajemen dapat menggunakan analisis CVP untuk menjawab pertanyaan seperti: "Berapa banyak unit yang harus dijual untuk mencapai target laba sebesar Rp 100 juta?" atau "Pada tingkat penjualan berapa perusahaan akan mencapai laba 15% dari penjualan?". Dengan menggunakan analisis CVP, manajemen dapat mengembangkan strategi perencanaan laba yang lebih terukur dan berbasis data.

Untuk menentukan penjualan yang diperlukan untuk mencapai target laba, manajemen dapat menggunakan rumus:  $\text{Penjualan (unit)} = (\text{Biaya Tetap} + \text{Target Laba}) / \text{Margin Kontribusi per unit}$ , atau  $\text{Penjualan (rupiah)} = (\text{Biaya Tetap} + \text{Target Laba}) / \text{Rasio Margin Kontribusi}$ . Rumus ini sangat berguna dalam perencanaan laba karena memungkinkan manajemen untuk mengidentifikasi tingkat penjualan yang realistis berdasarkan target laba yang ingin dicapai. Analisis CVP juga dapat digunakan untuk menganalisis dampak dari berbagai skenario bisnis, seperti perubahan harga penjualan, perubahan biaya variabel, atau perubahan biaya tetap, terhadap tingkat penjualan yang diperlukan untuk mencapai target laba.

#### **6.2.4 Derajat Leverage Operasi**

*Degree of Operating Leverage* (DOL) adalah ukuran sensitivitas perubahan keuntungan operasi terhadap perubahan penjualan. DOL dihitung dengan membagi *margin kontribusi* dengan keuntungan operasi atau dengan membagi persentase keuntungan operasi dengan persentase perubahan penjualan. DOL yang lebih tinggi menunjukkan bahwa perusahaan memiliki leverage operasi yang lebih tinggi, artinya perubahan kecil dalam penjualan akan menghasilkan perubahan yang lebih besar dalam keuntungan operasi.

Pemahaman tentang DOL sangat penting dalam manajemen risiko karena menunjukkan tingkat risiko operasi yang dihadapi perusahaan. Perusahaan dengan DOL yang tinggi mengalami lonjakan keuntungan yang lebih besar dalam merespons perubahan

penjualan, yang berarti risiko operasi lebih tinggi. Sebaliknya, perusahaan dengan DOL yang rendah mengalami akumulasi keuntungan yang lebih kecil, menunjukkan risiko operasi yang lebih rendah. DOL juga dapat digunakan untuk memprediksi dampak perubahan penjualan terhadap keuntungan, misalnya jika DOL sebesar 1,5 dan penjualan meningkat 10%, maka keuntungan operasi akan meningkat sekitar 15% ( $10\% \times 1,5$ ).

## 6.3 Margin Keamanan dan Penilaian Risiko

### 6.3.1 Konsep Margin of Safety

*Margin of Safety* (MOS) adalah istilah yang digunakan untuk menunjukkan seberapa jauh penjualan dapat turun sebelum perusahaan mencapai *titik impas*. Dengan kata lain, MOS mengukur tingkat keamanan atau buffer yang dimiliki perusahaan terhadap risiko penurunan penjualan. *Margin of Safety* dapat dinyatakan dalam bentuk satuan, nilai rupiah, atau persentase dari total penjualan. MOS yang lebih besar menunjukkan bahwa perusahaan memiliki tingkat keamanan yang lebih tinggi dan dapat mencapai penurunan penjualan yang lebih besar tanpa mengalami kerugian.

Perhitungan *Margin of Safety* dapat dilakukan dengan menggunakan rumus:  $MOS \text{ (unit)} = \text{Penjualan yang Direncanakan (unit)} - \text{Break-Even Point (unit)}$ , atau  $MOS \text{ (rupiah)} = \text{Penjualan yang Direncanakan (rupiah)} - \text{Break-Even Point (rupiah)}$ . Rasio MOS dihitung dengan membagi MOS dalam rupiah dengan penjualan yang direncanakan dalam rupiah, kemudian dikalikan

dengan 100% untuk mendapatkan persentase. MOS yang dinyatakan dalam persentase memberikan indikasi yang lebih mudah dipahami tentang tingkat keamanan perusahaan terhadap penurunan penjualan.

### **6.3.2 Penilaian Risiko Bisnis Menggunakan Margin of Safety**

*Margin of Safety* merupakan indikator penting dalam penilaian risiko bisnis perusahaan. Perusahaan dengan MOS yang tinggi (misalnya lebih dari 50%) menunjukkan tingkat risiko bisnis yang rendah karena penjualan dapat turun sebesar 50% atau lebih sebelum mencapai *titik impas*. Sebaliknya, perusahaan dengan MOS yang rendah (misalnya kurang dari 20%) menunjukkan tingkat risiko bisnis yang tinggi karena penurunan penjualan yang kecil dapat menyebabkan perusahaan mengalami kerugian. Analisis MOS membantu manajemen dalam mengidentifikasi tingkat risiko yang dihadapi perusahaan dan dalam mengembangkan strategi untuk meningkatkan keamanan finansial perusahaan.

Manajemen dapat menggunakan MOS sebagai alat untuk memantau kesehatan keuangan perusahaan secara berkala. Jika MOS terus menurun, hal ini menunjukkan bahwa tingkat risiko bisnis meningkat dan manajemen perlu mengambil tindakan korektif untuk meningkatkan penjualan atau mengurangi biaya. Sebaliknya, jika MOS meningkat, hal ini menunjukkan bahwa tingkat risiko bisnis menurun dan perusahaan memiliki lebih banyak ruang untuk melakukan investasi atau ekspansi. MOS juga dapat digunakan dalam skenario analisis untuk memutar dampak dari berbagai

perubahan kondisi bisnis terhadap kemampuan perusahaan untuk mencapai target laba.

### **6.3.3 Analisis Sensitivitas Margin of Safety**

Analisis sensitivitas *Margin of Safety* memungkinkan manajemen untuk memahami bagaimana perubahan dalam faktor-faktor kunci seperti harga jual, variabel biaya, dan biaya tetap akan mempengaruhi MOS. Melalui analisis sensitivitas, manajemen dapat mengidentifikasi variabel mana yang paling berpengaruh terhadap MOS dan dengan demikian fokus pada variabel-variabel pengelolaan tersebut (Pejovi et al., 2022). Analisis ini sangat berguna dalam pengambilan keputusan strategi karena memberikan gambaran tentang tingkat sensitivitas bisnis terhadap perubahan dalam lingkungan bisnis.

Analisis sensitivitas dapat dilakukan dengan menggunakan satu atau lebih dari beberapa metode. Metode *analisis sensitivitas satu arah* melibatkan perubahan satu variabel pada satu waktu sambil mempertahankan variabel lain tetap konstan. Misalnya, manajemen dapat menganalisis bagaimana MOS akan berubah jika harga jual naik 5%, sambil biaya variabel dan biaya tetap konstan. Metode *analisis sensitivitas multi-arah* melibatkan perubahan beberapa variabel secara bersamaan untuk menghasilkan kombinasi dampak dari berbagai perubahan terhadap MOS (Chen, 2025). Analisis sensitivitas ini membantu manajemen dalam mengidentifikasi skenario-skenario yang paling menguntungkan atau paling merugikan bagi perusahaan.

### **6.3.4 Interpretasi dan Penggunaan Margin of Safety dalam Pengambilan Keputusan**

Interpretasi yang tepat terhadap MOS sangat penting untuk pengambilan keputusan yang efektif. Jika MOS tinggi, manajemen dapat lebih agresif dalam melakukan investasi atau ekspansi karena tingkat risiko bisnis rendah. Jika MOS rendah, manajemen perlu lebih konservatif dan fokus pada peningkatan efisiensi operasi atau peningkatan penjualan. MOS juga dapat digunakan sebagai benchmark untuk membandingkan tingkat risiko bisnis dengan industri atau pesaing sejenis.

Dalam pengambilan keputusan, manajemen perlu mempertimbangkan target MOS yang sesuai dengan strategi dan toleransi risiko perusahaan. Beberapa perusahaan mungkin menargetkan MOS minimum sebesar 30%, sementara perusahaan lain mungkin menargetkan MOS yang lebih tinggi tergantung pada volatilitas industri dan kondisi ekonomi. Target MOS yang ditetapkan dengan baik memberikan panduan yang jelas bagi manajemen dalam melakukan strategi perencanaan dan pengambilan keputusan operasional.

## **6.4 Analisis Sensitivitas dalam Perencanaan Keuangan**

### **6.4.1 Definisi dan Tujuan Analisis Sensitivitas**

Analisis sensitivitas adalah teknik yang digunakan untuk mengukur seberapa sensitif hasil dari analisis finansial (seperti *titik*

*impas*, keuntungan, atau nilai proyek) terhadap perubahan dalam asumsi-asumsi kunci. Tujuan analisis sensitivitas adalah untuk mengidentifikasi variabel-variabel mana yang paling berpengaruh terhadap hasil finansial dan untuk memberikan gambaran tentang dampak dari penilaian terhadap keputusan bisnis (Chen, 2025). Analisis sensitivitas sangat penting dalam perencanaan keuangan karena membantu manajemen dalam memahami risiko-risiko yang mungkin dihadapi dan dalam mengembangkan strategi untuk mengatasi risiko-risiko tersebut.

Analisis sensitivitas dapat digunakan untuk berbagai tujuan dalam perencanaan keuangan. Pertama, analisis ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi variabel-variabel yang paling kritis dan memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan. Kedua, analisis ini dapat digunakan untuk memancarkan dampak dari berbagai skenario bisnis terhadap hasil finansial. Ketiga, analisis ini dapat digunakan untuk mengkomunikasikan risiko kepada para pemangku kepentingan, seperti investor atau pemberi pinjaman (Pejovi et al., 2022). Keempat, analisis ini dapat digunakan untuk mengoptimalkan keputusan bisnis dengan mempertimbangkan berbagai kemungkinan skenario.

#### **6.4.2 Metode-Metode Analisis Sensitivitas**

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk melakukan analisis sensitivitas, masing-masing dengan kekuatan dan kelemahan tertentu. Metode pertama adalah *analisis sensitivitas satu arah*, di mana satu variabel diubah pada satu waktu sementara variabel-variabel lain tetap konstan. Metode ini sederhana dan

mudah dipahami, namun tidak menangkap interaksi antara berbagai variabel (Li & Liu, 2024). Metode kedua adalah *analisis sensitivitas multi arah*, di mana beberapa variabel diubah secara bersamaan untuk menghasilkan dampak kombinasi dari berbagai perubahan terhadap hasil finansial.

Metode ketiga adalah *analisis skenario*, di mana serangkaian skenario (seperti skenario optimis, base case, dan pesimis) dikembangkan dan dianalisis untuk memberikan gambaran tentang rentang hasil yang mungkin terjadi. Metode ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang risiko dan peluang yang dihadapi perusahaan (Mjeda et al., 2025). Metode keempat adalah *simulasi Monte Carlo*, di mana probabilitas distribusi untuk setiap variabel yang ditentukan dan simulasi dilakukan untuk menghasilkan distribusi hasil yang mungkin. Metode ini sangat berguna untuk menangani konflik dan risiko dalam analisis finansial, namun memerlukan perangkat lunak khusus dan keahlian statistik yang lebih tinggi.

#### **6.4.3 Diagram Tornado dan Analisis Pareto**

*Diagram Tornado* adalah alat visualisasi yang berguna untuk menampilkan hasil dari *analisis sensitivitas satu arah*. Diagram berikut menunjukkan variabel-variabel yang paling berpengaruh terhadap hasil finansial dengan cara mengurutkan variabel-variabel berdasarkan dampaknya terhadap hasil. Nama "tornado" diberikan karena bentuk diagram yang menyerupai tornado, dengan variabel-variabel yang paling berpengaruh ditampilkan di bagian atas dan

variabel-variabel yang kurang berpengaruh di bagian bawah (Li & Liu, 2024).

*Analisis pareto* atau analisis 80/20 dapat digunakan bersama dengan *diagram tornado* untuk mengidentifikasi variabel-variabel yang paling signifikan. Analisis Pareto menunjukkan bahwa sebagian kecil dari variabel-variabel (biasanya sekitar 20%) bertanggung jawab atas sebagian besar dari dampak terhadap hasil (biasanya sekitar 80%). Dengan menggunakan analisis Pareto, manajemen dapat fokus pada variabel-variabel pengelolaan yang paling penting dan dengan demikian meningkatkan efektivitas strategi manajemen risiko (Sewando, 2024).

#### **6.4.4 Aplikasi Analisis Sensitivitas dalam Pengambilan Keputusan Investasi**

Analisis sensitivitas sangat penting dalam pengambilan keputusan investasi karena membantu investor dan manajemen dalam memahami risiko-risiko yang terkait dengan investasi. Dalam analisis evaluasi proyek investasi, sensitivitas dapat digunakan untuk mengidentifikasi variabel-variabel kunci seperti pendapatan, biaya operasi, dan biaya modal yang paling mempengaruhi *Net Present Value* (NPV) atau *Internal Rate of Return* (IRR) dari proyek (Chen, 2025). Dengan pemahaman ini, investor dapat mengembangkan strategi untuk mengurangi risiko atau untuk mengidentifikasi peluang guna meningkatkan keuntungan dari investasi.

Analisis sensitivitas juga dapat digunakan dalam pengambilan keputusan investasi untuk menentukan *harga impas* atau volume untuk berbagai variabel kunci. Misalnya, dalam

proyek energi terbarukan, analisis sensitivitas dapat menunjukkan pada harga energi berapa proyek akan mencapai titik impas, atau berapa banyak unit energi yang harus diproduksi untuk mencapai target IRR (Darman & Wibisono, 2021). Informasi ini sangat berguna dalam negosiasi kontrak, penetapan tarif, dan pengambilan keputusan strategi lainnya.

## **6.5 Penerapan Praktis Titik Impas dan Sensitivitas dalam Industri**

### **6.5.1 Analisis Titik Impas dalam Industri Pertanian dan Agribisnis**

Dalam industri pertanian dan agribisnis, analisis *titik impas* sangat penting untuk membantu petani dan pelaku usaha agribisnis dalam mengambil keputusan tentang jenis tanaman yang akan ditanam, jumlah investasi yang diperlukan, dan strategi harga. Analisis sensitivitas dalam konteks pertanian membantu untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap profitabilitas usaha pertanian, seperti harga input, harga output, dan produktivitas lahan.

Studi kasus pada usaha broiler menggunakan analisis *titik impas* untuk menunjukkan bahwa bisnis dapat mentoleransi penurunan harga jual sebesar 14,75% atau peningkatan biaya variabel sebesar 17,70% tanpa mengalami kerugian. Informasi ini sangat berguna bagi petani broiler untuk memahami margin keamanan mereka dan untuk mengembangkan strategi manajemen

risiko yang tepat. Dalam industri peternakan dan pertanian lainnya, analisis sensitivitas juga dapat digunakan untuk memancarkan dampak dari perubahan iklim, perubahan kebijakan pemerintah, atau perubahan teknologi terhadap profitabilitas usaha (Sewando, 2024).

### **6.5.2 Analisis CVP dalam Industri Layanan dan Ritel**

Dalam industri layanan dan ritel, analisis CVP sangat berguna untuk perencanaan laba dan pengambilan keputusan operasional. Analisis ini membantu manajemen dalam menentukan tingkat penjualan yang diperlukan untuk mencapai target laba, dalam menghasilkan dampak dari perubahan harga terhadap keuntungan, dan dalam membuat keputusan tentang struktur biaya perusahaan. Dalam industri perhotelan, misalnya, analisis CVP dapat digunakan untuk menentukan tingkat okupansi kamar yang diperlukan untuk mencapai titik impas atau target laba tertentu.

Studi kasus pada usaha mikro kecil menengah (UMKM) dalam berbagai industri seperti restoran, toko roti, dan penjual bunga menunjukkan bahwa aplikasi analisis CVP membantu pemilik usaha dalam merencanakan laba dengan lebih sistematis dan berbasis data. Dengan menggunakan analisis CVP, pemilik UMKM dapat mengidentifikasi jumlah unit yang harus dijual untuk mencapai titik impas atau target laba, dapat memahami dampak dari perubahan harga atau biaya terhadap keuntungan, dan dapat membuat keputusan yang lebih terinformasi tentang strategi bisnis.

### **6.5.3 Analisis Sensitivitas dalam Evaluasi Proyek Infrastruktur dan Energi**

Dalam evaluasi proyek infrastruktur dan energi, analisis sensitivitas sangat penting untuk mengidentifikasi risiko-risiko proyek dan mengembangkan strategi mitigasi risiko. Analisis ini membantu dalam mengidentifikasi variabel-variabel kunci yang paling berpengaruh terhadap profitabilitas proyek, seperti biaya konstruksi, biaya operasi, harga energi, atau volume permintaan (Darman & Wibisono, 2021). Dengan pemahaman ini, proyek dapat dirancang dan dikelola dengan lebih baik untuk mengurangi risiko atau meningkatkan keuntungan.

Studi kasus pada proyek pembangunan pembangkit listrik dengan gas alam terkonversi (PLTMG) menunjukkan bagaimana analisis sensitivitas digunakan untuk mentransmisikan kelayakan proyek dan mengidentifikasi faktor-faktor yang paling kritis untuk keberhasilan proyek. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa harga gas alam merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap profitabilitas proyek, sehingga strategi manajemen risiko harus fokus pada pengelolaan risiko penumpukan harga gas alam. Dalam proyek energi terbarukan, analisis sensitivitas dapat digunakan untuk menentukan tingkat subsidi atau harga energi minimum yang diperlukan untuk membuat proyek menjadi layak secara finansial.

### **6.5.4 Analisis Titik Impas dalam Pengambilan Keputusan Investasi Properti**

Dalam investasi properti, analisis *titik impas* dan analisis sensitivitas sangat penting untuk menghasilkan kelayakan investasi

properti. Analisis ini membantu investor dalam menentukan harga jual atau harga sewa yang tepat, dalam mengidentifikasi tingkat impas sewa atau tingkat hunian impas, dan dalam memahami dampak dari perubahan kondisi pasar terhadap return dari investasi. Analisis sensitivitas juga dapat digunakan untuk memberikan dampak dari perubahan suku bunga, inflasi, atau kondisi pasar lainnya terhadap keputusan investasi properti.

Analisis titik impas dalam investasi properti dapat mencakup perhitungan payback period, di mana investor dapat menentukan berapa tahun investasi akan kembali modal awalnya, dan analisis net present value atau internal rate of return untuk mencakup return dari investasi. Dengan menggunakan analisis ini, investor dapat membuat keputusan investasi yang lebih tepat dan dapat mengidentifikasi properti yang menarik untuk diinvestasikan berdasarkan return yang diharapkan dan tingkat risiko yang dapat diterima.

# **Bab 7: Daftar Energi**

## **Pembangkitan Ekonomi**

---

**Ir. Suparman, S.T., M.T.**

### **7.1 Konsep Dasar Ekonomi Pembangkitan Energi Listrik**

#### **7.1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Ekonomi Pembangkitan Energi Listrik**

Ekonomi pembangkitan energi listrik merupakan ilmu yang mempelajari bagaimana sumber daya energi dipilih untuk menghasilkan listrik dengan efisiensi maksimal dan biaya minimal (**Supriadi & Sudiarto, 2025**). Pembangkitan energi listrik melibatkan pengolahan berbagai sumber energi, baik dari energi fosil maupun energi terbarukan, menjadi energi listrik yang dapat didistribusikan kepada konsumen (**Kusuma & Dalimi, 2025**). Pemahaman mendalam tentang pemanfaatan ekonomi sangat penting dalam konteks sistem perencanaan ketenagalistrikan nasional dan pengambilan keputusan investasi (**Supriadi & Sudiarto, 2025**). Ruang lingkup ekonomi pembangkitan energi listrik mencakup analisis biaya produksi, penentuan tarif listrik, evaluasi kelayakan investasi, dan optimalisasi penggunaan sumber daya energi (**Kartikasari et al., 2024**).

### **7.1.2 Tujuan dan Manfaat Analisis Ekonomi Pembangkit Energi Listrik**

Tujuan utama analisis ekonomi pembangkit listrik adalah menentukan struktur biaya produksi listrik yang akurat dan mengidentifikasi cara-cara untuk meningkatkan efisiensi ekonomi dari pembangkit listrik (**Kusuma & Dalimi, 2025**). Melalui analisis ekonomi yang komprehensif, dapat ditentukan harga jual listrik yang kompetitif namun tetap memberikan keuntungan yang layak bagi kerugian (**Supriadi & Sudiarto, 2025**). Manfaat praktis dari analisis ekonomi manfaat termasuk optimalisasi alokasi investasi, perencanaan pengembangan manfaat jangka panjang, dan pengambilan keputusan yang rasional dalam memilih teknologi pemanfaatan (**Kartikasari et al., 2024**). Analisis ekonomi juga membantu dalam membandingkan berbagai opsi manfaat dan memilih yang paling menguntungkan dari perspektif ekonomi dan lingkungan (**Yunesti & Wardani, 2025**).

### **7.1.3 Struktur Pembiayaan Pembangkit Listrik**

Pembangunan pembangkit listrik memerlukan modal yang sangat besar, baik dari modal sendiri maupun pinjaman dari institusi finansial (**Rianto & Adi, 2024**). Struktur pembiayaan pembangkit listrik biasanya terdiri dari kombinasi ekuitas (modal sendiri) dan hutang (pinjaman), dengan proporsi yang berbeda-beda tergantung pada kondisi pasar dan kebijakan perusahaan (**Karnanto et al., 2023**). Pada proyek pembangkit listrik hybrid diesel-surya, struktur pembiayaan umum menggunakan 30% modal sendiri dan 70% pinjaman bank dengan periode pengembalian 10-15

tahun (**Karnanto et al., 2023**). Pemilihan struktur pembiayaan yang optimal sangat penting karena mempengaruhi biaya modal (*cost of capital*) dan kelayakan finansial dari proyek pembangkitan (**Rianto & Adi, 2024**).

#### **7.1.4 Parameter Ekonomi Kunci dalam Pembangkitan Energi Listrik**

Parameter ekonomi kunci dalam pembangkitan energi listrik meliputi *Levelized Cost of Energy (LCOE)*, *Net Present Value (NPV)*, dan *Internal Rate of Return (IRR)* (**Kartikasari et al., 2024**). *LCOE* adalah biaya rata-rata per satuan energi yang dihasilkan selama umur proyek, yang memungkinkan perbandingan antar teknologi pembangkitan (**Yunesti & Wardani, 2025**). *NPV* mengukur nilai tambah finansial dari investasi, sementara *IRR* menunjukkan tingkat pengembalian investasi dalam bentuk persentase (**Kartikasari et al., 2024**). Parameter lain yang penting termasuk *Payback Period (PP)*, *Benefit-Cost Ratio (BCR)*, dan *Discounted Payback Period (DPP)* yang digunakan untuk memiliki kelayakan proyek finansial (**Rianto & Adi, 2024**).

## **7.2 Komponen Biaya Pembangkitan Energi Listrik**

### **7.2.1 Biaya Modal (*Biaya Modal*)**

Biaya modal merupakan pengeluaran awal yang diperlukan untuk membangun dan memasang infrastruktur pembangkit listrik, termasuk peralatan utama, konstruksi sipil, dan pekerjaan

engineering (**Kusuma & Dalimi, 2025**). Untuk pembangkit listrik tenaga surya (*PLTS*), biaya modal terdiri dari panel surya, inverter, sistem penyimpanan energi, struktur penopang, dan biaya instalasi (**Yunesti & Wardani, 2025**). Biaya modal pembangkit listrik hybrid diesel-surya dapat mencapai miliaran rupiah tergantung pada kapasitas dan lokasi pembangkit (**Karnanto et al., 2023**). Investasi modal yang besar pada tahap awal proyek memerlukan analisis yang cermat untuk memastikan kelayakan finansial jangka panjang (**Kartikasari et al., 2024**).

### **7.2.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan (*Biaya Operasional dan Pemeliharaan*)**

Biaya operasional dan pemeliharaan mencakup semua pengeluaran untuk menjalankan pembangkit listrik selama operasional, termasuk biaya bahan bakar, gaji tenaga kerja, biaya pemeliharaan rutin, dan penggantian komponen yang rusak (**Rianto & Adi, 2024**). Untuk pembangkit listrik tenaga diesel (*PLTD*), biaya operasional didominasi oleh biaya bahan bakar yang dapat mencapai 60-80% dari total biaya operasional (**Kusuma & Dalimi, 2025**). Untuk pembangkit listrik terbarukan seperti *PLTS*, biaya operasional jauh lebih rendah karena tidak memerlukan bahan bakar, meskipun tetap perlu biaya pemeliharaan berkala (**Supriadi & Sudiarto, 2025**). Estimasi biaya operasional yang akurat sangat penting dalam perhitungan *LCOE* dan kelayakan finansial proyek jangka panjang (**Yunesti & Wardani, 2025**).

### 7.2.3 Biaya Penggantian Komponen dan Peremajaan

Selama umur operasional proyek yang panjang (20-25 tahun), beberapa komponen perlu diganti karena telah melampaui umur teknisnya (**Kartikasari et al., 2024**). Pada pembangkit listrik tenaga surya, inverter umumnya perlu diganti setelah 10-15 tahun beroperasi, sementara panel surya dapat bertahan hingga 25-30 tahun dengan efisiensi yang terus menurun (**Rianto & Adi, 2024**). Biaya penempatan baterai untuk sistem penyimpanan energi juga merupakan komponen biaya yang signifikan yang harus dipertimbangkan dalam analisis ekonomi (**Kusuma & Dalimi, 2025**). Proyeksi biaya penggantian komponen harus diestimasi dengan cermat dan dimasukkan ke dalam perhitungan *LCOE* dan analisis kelayakan finansial (**Yunesti & Wardani, 2025**).

### 7.2.4 Biaya Dekomisi dan Remedial Lingkungan

Pada akhir umur operasional pembangkit listrik, diperlukan biaya untuk membongkar fasilitas dan mengembalikan lokasi ke kondisi semula (*decommissioning*) (**Kartikasari et al., 2024**). Untuk pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil, diperlukan juga biaya perbaikan lingkungan untuk membersihkan polusi tanah dan udara yang mungkin terjadi (**Rianto & Adi, 2024**). Biaya dekomisioning dan perbaikan lingkungan merupakan komponen yang sering digunakan dalam analisis ekonomi awal proyek, namun dapat menjadi signifikan pada akhir proyek (**Supriadi & Sudiarto, 2025**). Estimasi biaya ini harus dimasukkan ke dalam perhitungan *Life Cycle Cost (LCC)* untuk mendapatkan

gambaran total biaya proyek yang akurat (Yunesti & Wardani, 2025).

## 7.3 Metode Perhitungan Biaya Pembangkitan Energi Listrik

### 7.3.1 Levelized Cost of Energy (LCOE) dan perhitungannya

*Levelized Cost of Energy (LCOE)* adalah metode perhitungan yang mengubah seluruh biaya operasional pembangkitan selama umur proyek menjadi biaya rata-rata per satuan energi yang dihasilkan (Kartikasari et al., 2024). Rumus dasar *LCOE* (Yunesti & Wardani, 2025) adalah:

$$LCOE = \frac{\text{Total Biaya Seumur Hidup}}{\text{Total Produksi Energi Seumur Hidup}}$$

*LCOE* memungkinkan perbandingan yang adil antara berbagai pemanfaatan teknologi dengan umur proyek dan kondisi operasional yang berbeda-beda (Supriadi & Sudiarto, 2025). Untuk pembangkit listrik terbarukan, *LCOE* umumnya lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik konvensional karena tidak ada biaya bahan bakar yang signifikan (Kartikasari et al., 2024).

### 7.3.2 Biaya Pokok Penyediaan (BPP) dan Tarif Listrik

Biaya Pokok Penyediaan (*BPP*) adalah biaya total dari pembangkitan, transmisi, dan distribusi listrik yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan tarif listrik kepada konsumen

(Supriadi & Sudiarto, 2025). *BPP* berbeda dengan *LCOE* karena merupakan agregat biaya sistem kelistrikan secara keseluruhan, bukan hanya pembangkit saja (Kusuma & Dalimi, 2025). Penetapan tarif listrik yang kompetitif memerlukan analisis yang cermat untuk memastikan keseimbangan antara kelayakan manfaat finansial dan terjangkauanya harga bagi konsumen (Kartikasari et al., 2024). Dengan teknologi pembangkit terbaru yang semakin murah, *LCOE* pembangkit surya dan angin telah mampu bersaing dengan pembangkit konvensional (Yunesti & Wardani, 2025).

### 7.3.3 Biaya Siklus Hidup (*LCC*) dan Total Biaya Kepemilikan

*Life Cycle Cost (LCC)* adalah metode perhitungan yang mencakup semua biaya yang terkait dengan pembangkit listrik selama seluruh siklus hidupnya, mulai dari perencanaan hingga dekomisioning (Kartikasari et al., 2024). *LCC* berbeda dengan *LCOE* karena merupakan perhitungan total biaya absolut, bukan biaya per satuan energi (Supriadi & Sudiarto, 2025). Perhitungan *LCC* memerlukan diskon biaya-biaya di masa depan ke nilai sekarang menggunakan tingkat diskonto tertentu (Rianto & Adi, 2024). *LCC* sangat berguna untuk membandingkan alternatif investasi pembangkit dengan umur teknis yang sama (Yunesti & Wardani, 2025).

### 7.3.4 Analisis Sensitivitas dan Analisis Risiko

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui bagaimana perubahan parameter-parameter kunci seperti biaya modal, biaya operasional, harga listrik, dan efisiensi dampak mempengaruhi hasil analisis ekonomi (Kartikasari et al., 2024). Parameter yang paling

sensitif biasanya adalah harga listrik, biaya bahan bakar (untuk pembangkit konvensional), dan biaya modal (Kusuma & Dalimi, 2025). Analisis risiko menggunakan metode probabilistik seperti Monte Carlo untuk memodelkan wilayah dalam berbagai parameter ekonomi (Rianto & Adi, 2024). Analisis sensitivitas dan risiko membantu dalam mengidentifikasi risiko kunci dan mengembangkan strategi mitigasi risiko (Supriadi & Sudiarto, 2025).

## 7.4 Analisis Kelayakan Finansial Proyek Pembangkitan Energi Listrik

### 7.4.1 Net Present Value (NPV) dan Penggunaannya

*Net Present Value (NPV)* adalah selisih antara nilai sekarang dari penerimaan dan pengeluaran proyek selama umur proyek (Kartikasari et al., 2024). Rumus *NPV* (Yunesti & Wardani, 2025) adalah:

$$NPV = \sum \left[ \frac{(\text{Arus Kas Masuk} - \text{Arus Kas Keluar})}{(1 + \text{tingkat diskonto})^t} \right]$$

Proyek dengan *NPV* positif dinyatakan layak secara finansial, sementara proyek dengan *NPV* negatif tidak direkomendasikan untuk dilaksanakan (Supriadi & Sudiarto, 2025). *NPV* merupakan parameter yang paling komprehensif karena

mempertimbangkan semua arus kas dan nilai waktu uang (Kartikasari et al., 2024).

#### **7.4.2 Tingkat Pengembalian Internal (*IRR*) dan Periode Pengembalian Modal**

*Internal Rate of Return (IRR)* adalah tingkat pengembalian investasi yang membuat *NPV* sama dengan nol (Kartikasari et al., 2024). Proyek dinyatakan layak jika *IRR* lebih besar dari tingkat pengembalian yang diharapkan (*Weighted Average Cost of Capital* atau *WACC*) (Yunesti & Wardani, 2025). *Payback Period (PP)* adalah lama waktu yang diperlukan untuk mengembalikan investasi awal dari arus kas positif yang dihasilkan (Supriadi & Sudiarto, 2025). *Payback Period* memberikan indikasi cepat tentang likuiditas investasi, namun tidak mempertimbangkan nilai waktu uang seperti *IRR* dan *NPV* (Kartikasari et al., 2024).

#### **7.4.3 Rasio Manfaat-Biaya (*BCR*) dan Indeks Profitabilitas**

*Benefit-Cost Ratio (BCR)* adalah perbandingan antara nilai sekarang dari penerimaan dengan pengeluaran proyek (Yunesti & Wardani, 2025). Proyek dinyatakan layak jika *BCR* lebih besar dari 1, yang berarti penerimaan lebih besar dari pengeluaran (Kartikasari et al., 2024). *Indeks Profitabilitas* adalah rasio antara nilai sekarang dari arus kas positif dengan investasi awal (Supriadi & Sudiarto, 2025). Parameter ini sangat berguna untuk membandingkan proyek-proyek dengan skala investasi yang berbeda-beda (Rianto & Adi, 2024).

#### **7.4.4 Periode Pengembalian Investasi yang Didiskon (Discounted Payback Period/ *DPP*) dan Pengembalian Investasi (Return on Investment/ *ROI*)**

*Discounted Payback Period (DPP)* adalah waktu lama untuk pengembalian investasi yang mempertimbangkan nilai waktu uang dengan menggunakan tingkat diskonto tertentu (Kartikasari et al., 2024). *DPP* memberikan informasi yang lebih akurat dibandingkan *Payback Period* biasa karena mempertimbangkan nilai waktu uang (Yunesti & Wardani, 2025). *Return on Investment (ROI)* (Supriadi & Sudiarto, 2025) adalah persentase keuntungan yang diperoleh dari investasi, dihitung sebagai berikut:

$$ROI = \left[ \frac{(\text{Nilai Akhir} - \text{Investasi Awal})}{(\text{Investasi Awal})} \right] \times 100\%$$

Kombinasi dari berbagai parameter seperti *NPV*, *IRR*, *BCR*, dan *DPP* memberikan gambaran yang komprehensif tentang kelayakan finansial suatu proyek (Kartikasari et al., 2024).

### **7.5 Studi Kasus Ekonomi Pembangkitan Energi Listrik**

#### **7.5.1 Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (*PLTS*)**

Pembangkit listrik tenaga surya telah menjadi pilihan investasi yang semakin menarik karena penurunan biaya panel surya

dan peningkatan efisiensi (Yunesti & Wardani, 2025). Analisis ekonomi pada proyek *PLTS* atap on-grid dengan kapasitas 6,05 kWp menunjukkan *LCOE* sebesar Rp1.218,18/kWh, *NPV* positif Rp14.686.055, dan *IRR* 12,76% (Yunesti & Wardani, 2025). Untuk proyek *PLTS* rooftop dengan kapasitas 38,2 kWp, hasil analisis menunjukkan nilai *NPV* positif Rp534.162.123, *Profitability Index* 1,98, dan *Payback Period* 8,5 tahun (Lisdawati et al., 2022). Investasi pada *PLTS* berkapasitas 50 MWp di kawasan khusus menunjukkan *LCOE* sebesar Rp1.018,64/kWh dengan *NPV* Rp34.590 miliar dan *IRR* 10,58% (Kartikasari et al., 2024).

#### 7.5.2 Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Hibrida

Pembangkit listrik hibrida yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi merupakan alternatif yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi sistem ketenagalistrikan (Rianto & Adi, 2024). Pada studi kasus pembangkit listrik hybrid diesel-surya di Pulau Sambu, kapasitas *PLTS* optimal adalah 833 kWp dengan biaya rata-rata energi Rp3.710/kWh, investasi awal Rp10.465.295.346, dan *payback period* 2,5 tahun (Karnanto et al., 2023). Analisis ekonomi pembangkit listrik hibrida di Pulau Sebesi menunjukkan bahwa sistem hybrid diesel-surya-hidrogen menghasilkan *LCOE* terendah \$0,247/kWh dengan pengurangan emisi CO hingga 99,1% (Rianto & Adi, 2024). Sistem pembangkitan hibrida terbukti dapat mengurangi biaya operasional secara signifikan dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga diesel murni (Kusuma & Dalimi, 2025).

### 7.5.3 Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Energi Terbarukan Lainnya

Pembangkit listrik tenaga air mikro (*PLTMH*) menunjukkan hasil analisis ekonomi yang bervariasi tergantung pada kondisi hidrologi lokal (**Supriadi & Sudiarto, 2025**). Analisis ekonomi *PLTMH* kapasitas 25 kW menunjukkan *payback period* 5-3 bulan, *NPV* positif Rp3.320-2.520 miliar, dan *BCR* 1,05-0,79 (**Suatan et al., 2020**). Pembangkit listrik tenaga biogas dari limbah kelapa sawit menunjukkan *LCOE* yang sangat kompetitif ketika mempertimbangkan nilai limbah sebagai bahan baku (**Rianto & Adi, 2024**). Pembangkit listrik tenaga angin (*PLTB*) di lokasi dengan potensi angin yang baik menunjukkan *NPV* positif dan *IRR* di atas 15%, menjadikannya investasi yang layak (**Hadi, 2025**).

### 7.5.4 Perbandingan Ekonomi Antar Teknologi Pembangkitan

Perbandingan ekonomi antar teknologi pembangkitan menunjukkan bahwa pembangkit listrik terbarukan semakin kompetitif dengan pembangkit konvensional (**Supriadi & Sudiarto, 2025**). Analisis perbandingan *LCOE* berbagai teknologi menunjukkan bahwa *LCOE PLTS* mencapai Rp1.000-1.500/kWh, jauh lebih rendah dari *PLTD* yang mencapai Rp5.000-6.000/kWh (**Kusuma & Dalimi, 2025**). Dengan mempertimbangkan efek eksternalitas lingkungan, pembangkit terbarukan menjadi lebih menguntungkan secara total (**Kartikasari et al., 2024**). Tren penurunan biaya modal untuk teknologi terbaru menunjukkan bahwa investasi pada energi terbarukan akan semakin menarik di masa depan (**Yunesti & Wardani, 2025**).

# Bab 8: Tarif dan Harga Daftar Energi

---

Ir. Yulianto La Elo, S.T., M.T., IPM.

## 8.1 Fondasi Sistem Tarif Energi Listrik

### 8.1.1 Pengertian dan Tujuan Tarif Listrik

Tarif listrik merupakan struktur harga yang dikenakan oleh penyedia tenaga listrik kepada konsumen sebagai kompensasi atas penyediaan energi listrik. Dalam sistem tenaga modern, tarif tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme penagihan, tetapi juga sebagai instrumen ekonomi yang mengatur interaksi antara sisi suplai dan permintaan. Tarif ini berfungsi sebagai antarmuka utama antara jaringan operator dan pengguna akhir, dan dirancang dengan mempertimbangkan berbagai tujuan ekonomi, sosial, dan teknis. Pada dasarnya, tarif listrik harus mencerminkan biaya sebenarnya dari penyediaan energi listrik, termasuk biaya pembangkitan, transmisi, distribusi, dan operasional, sambil tetap menjaga keterjangkauan bagi konsumen (Kandel et al., 2026).

Secara konseptual, desain tarif listrik harus memenuhi beberapa tujuan utama. Pertama, *kecukupan pendapatan* atau kecukupan pendapatan, di mana tarif harus menghasilkan pendapatan yang cukup untuk menutup biaya operasional dan memungkinkan investasi berkelanjutan dalam infrastruktur.

Kedua, *reflektivitas biaya* atau reflektivitas biaya, di mana tarif harus mencerminkan biaya nyata dari layanan yang disediakan, sehingga mendorong penggunaan yang efisien dan alokasi sumber daya yang optimal. Ketiga, *keterjangkauan* atau keterjangkauan, dimana tarif harus tetap terjangkau bagi semua segmen masyarakat, terutama kelompok berpendapatan rendah. Keempat, tarif harus sederhana dan dapat dipahami oleh konsumen sehingga mereka dapat mengambil keputusan konsumsi yang terinformasi (Singh et al., 2025).

### **8.1.2 Prinsip Ekonomi dalam Penetapan Tarif**

Penetapan tarif listrik didasarkan pada beberapa prinsip ekonomi fundamental yang berasal dari teori ekonomi miklaster dan *ekonomi utilitas*. Prinsip pertama adalah *penetapan harga biaya marjinal*, di mana tarif idealnya harus mencerminkan biaya marjinal dari penyediaan energi pada waktu dan lokasi tertentu. Biaya marginal ini termasuk biaya bahan bakar, biaya operasional dan pemeliharaan, serta biaya yang terkait dengan hilangnya daya di jaringan (Navajas, 2023). Namun, dalam praktiknya, tarif berdasarkan biaya marginal murni sering tidak dapat diterapkan karena adanya biaya tetap yang besar dan pertimbangan sosial dan regulasi.

Prinsip kedua adalah *penetapan harga biaya layanan*, di mana tarif ditetapkan untuk mengembalikan total biaya layanan, termasuk biaya tetap dan biaya variabel. Hal ini memastikan kelangsungan finansial dari operator utilitas sambil menciptakan insentif yang tepat bagi konsumen untuk mengurangi konsumsi pada

periode puncak. Prinsip ketiga adalah *ekonomi sisi permintaan*, yang menekankan bahwa harga listrik harus dirancang untuk mempengaruhi perilaku konsumsi melalui respon permintaan elastis terhadap harga (*elastisitas harga permintaan*). Respons konsumen terhadap perubahan harga menjadi dasar dalam desain tarif dinamis. Dengan menetapkan harga yang lebih tinggi pada periode puncak dan harga lebih rendah pada periode lembah, utilitas dapat meratakan beban puncak dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

### **8.1.3 Komponen Biaya dalam Struktur Tarif**

Struktur tarif listrik modern terdiri dari beberapa komponen biaya yang berbeda. Komponen pertama adalah *biaya energi* atau biaya energi, yang merupakan biaya variabel per kilowatt-jam (*kWh*) yang dihitung berdasarkan jumlah energi yang dikonsumsi. Komponen ini mencerminkan biaya bahan bakar, operasional pembangkit, dan transmisi (Nair & Nair, 2023). Komponen kedua adalah *demand charge* atau biaya permintaan, yang didasarkan pada puncak daya (*peak demand*) yang digunakan selama periode tertentu (biasanya per 15 menit atau per jam). Biaya ini mencerminkan investasi dalam infrastruktur untuk mendukung puncak beban dan insentif bagi konsumen untuk mengurangi puncak permintaan mereka.

Komponen ketiga adalah *fixed charge* atau biaya tetap, yang merupakan biaya bulanan atau tahunan yang tidak bergantung pada penggunaan listrik. Biaya ini meliputi biaya administrasi, pembacaan meter, dan penggunaan jaringan distribusi. Komponen

keempat adalah *connection charge* atau biaya koneksi, yang dikenakan sekali saat konsumen tersambung ke jaringan listrik. Setiap komponen ini dirancang untuk mencerminkan aspek berbeda dari penyediaan layanan listrik dan untuk menciptakan insentif yang tepat bagi konsumsi yang efisien.

#### **8.1.4 Tantangan dalam Desain Tarif Modern**

Desain tarif listrik menghadapi tantangan yang semakin kompleks di era modern dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi. Tantangan pertama adalah volatilitas harga bahan bakar dan *harga pasar grosir*, yang membuat sulit untuk menetapkan tarif yang stabil dan dapat diprediksi oleh konsumen. Tantangan kedua adalah integrasi sumber energi terbarukan seperti energi surya dan angin, yang memiliki biaya marginal nol tetapi biaya investasi awal yang tinggi dan karakteristik output yang tidak dapat diprediksi (Hughes & Sharif, 2025).

Tantangan ketiga adalah perlunya mendorong penerapan teknologi baru seperti kendaraan listrik, pompa panas, dan *sumber daya energi terdistribusi*, yang memerlukan sinyal harga yang mencerminkan nilai sesungguhnya dari permintaan. Tantangan keempat adalah menjaga keseimbangan antara efisiensi ekonomi dan keadilan distributif, memastikan bahwa tarif yang mencerminkan biaya marjinal tidak menghasilkan beban keterjangkauan yang tidak dapat ditanggung oleh kelompok rendah (Lerbinger et al., 2025).

## 8.2 Struktur Tarif Listrik Konvensional

### 8.2.1 Tarif Volumetrik dan Blok Kenaikan

Tarif volumetrik, juga dikenal sebagai *inclining block rate* (IBR) atau tarif tangga, adalah struktur tarif tradisional di mana harga per unit energi meningkat seiring dengan peningkatan konsumsi. Sistem ini dirancang dengan asumsi bahwa konsumsi pertama (untuk kebutuhan dasar) harus terjangkau, sementara konsumsi tambahan (yang dianggap sebagai mewah) dapat dikenakan harga yang lebih tinggi. Contoh dari struktur ini adalah: blok pertama untuk 0-100 kWh per bulan dengan harga Rp 1.000 per kWh, blok kedua untuk 101-200 kWh dengan harga Rp 1.500 per kWh, dan blok ketiga untuk >200 kWh dengan harga Rp 2.000 per kWh (Talhar, 2019).

Keuntungan dari struktur tarif blok kenaikan adalah kemudahan, mudah dipahami konsumen, dan memberikan perlindungan kepada konsumen dengan penggunaan yang rendah. Namun, struktur ini memiliki kelemahan yang signifikan. Pertama, sistem ini menciptakan *subsidi silang* di mana konsumen dengan penggunaan rendah disubsidi oleh konsumen dengan penggunaan tinggi, yang dapat merupakan efisiensi yang buruk. Kedua, struktur ini tidak mencerminkan biaya marginal sebenarnya dari penyediaan layanan pada waktu yang berbeda, sehingga tidak memberikan insentif yang tepat untuk perubahan perilaku konsumsi.

### **8.2.2 Tarif Datar (*Tarif Tetap*)**

Tarif datar adalah struktur tarif di mana harga per unit energi ( $kWh$ ) adalah konstan terlepas dari besarnya konsumsi atau waktu penggunaan. Struktur ini adalah yang paling sederhana dan memudahkan administrasi, tetapi juga paling tidak efisien dari perspektif ekonomi (Hughes & Sharif, 2025). Tarif datar tidak memberikan insentif bagi konsumen untuk mengurangi konsumsi pada periode puncak beban sistem, yang dapat mengakibatkan investasi infrastruktur yang lebih besar untuk menangani puncak beban yang tinggi.

Meskipun rendahnya tarif datar menarik dari perspektif administrasi dan komunikasi konsumen, struktur ini dianggap tidak sesuai dengan tantangan sistem listrik modern. Dengan penetrasi energi terbarukan yang meningkat dan kebutuhan untuk meningkatkan permintaan, pergeseran menjauh dari tarif datar menuju struktur yang lebih kompleks yang mencerminkan nilai sebenarnya dari energi pada waktu yang berbeda menjadi sangat penting.

### **8.2.3 Tarif Berdasarkan Kategori Konsumen**

Struktur tarif tradisional sering membedakan antara berbagai kategori konsumen, termasuk konsumen residensial, komersial, industrial, dan publik. Setiap kategori dikenakan tarif yang berbeda-beda, yang mencerminkan perbedaan dalam pola konsumsi, faktor *beban* (load factor), dan kapasitas pembayaran. Konsumen industri, misalnya, biasanya mengenakan tarif yang lebih rendah karena pola konsumsi mereka yang lebih stabil dan mudah

diprediksi, sementara konsumen residensial mengenakan tarif yang lebih tinggi untuk mendukung biaya administrasi yang lebih besar per unit (Nair & Nair, 2023).

Pembedaan tarif berdasarkan kategori konsumen dapat dibenarkan dari perspektif ekonomi karena perbedaan nyata dalam biaya penyediaan layanan kepada konsumen yang berbeda-beda. Namun, sistem ini juga dapat menciptakan ketidakadilan, terutama ketika konsumen perumahan berpendapat rendahnya tarif yang dikenakan jauh lebih tinggi daripada konsumen industri besar. Beberapa negara telah mencoba mengatasi masalah ini melalui skema subsidi silang terstruktur yang melindungi konsumen berpendapatan rendah sambil memastikan bahwa konsumen dengan kemampuan membayar lebih tinggi berkontribusi pada biaya layanan.

#### **8.2.4 Batasan Struktur Tarif Konvensional**

Struktur tarif konvensional menghadapi banyak keterbatasan dalam konteks sistem listrik modern. Pertama, struktur ini tidak responsif terhadap kondisi real-time dari sistem, sehingga tidak dapat memberikan sinyal harga yang mencerminkan biaya sebenarnya dari penyediaan energi pada waktu tertentu. Kedua, struktur ini tidak mendorong penggunaan teknologi yang meningkatkan permintaan, seperti pengisian kendaraan listrik yang dapat dioptimalkan secara dinamis atau sistem manajemen energi rumah yang responsif terhadap harga.

Ketiga, struktur konvensional tidak sesuai dengan integrasi energi terbarukan dalam skala besar, yang memerlukan adanya

permintaan yang signifikan untuk menyeimbangkan keluaran variabel dari sumber-sumber tersebut. Keempat, struktur ini menciptakan hambatan bagi partisipasi konsumen dalam pasar listrik yang semakin terintegrasi dan kompetitif, di mana sinyal harga yang akurat menjadi semakin penting untuk efisiensi sistem secara keseluruhan (Navajas, 2023).

## **8.3 Tarif Berbasis Waktu (Waktu Penggunaan - ToU)**

### **8.3.1 Konsep dan Desain Tarif Berbasis Waktu**

Tarif berbasis waktu (*Time-of-Use* atau ToU) adalah struktur tarif di mana harga listrik bervariasi tergantung pada waktu penggunaan, dengan harga yang lebih tinggi selama periode puncak beban dan harga yang lebih rendah selama periode beban lembah. Konsep ini didasarkan pada prinsip bahwa biaya marginal dari penyediaan listrik secara signifikan berbeda tergantung pada waktu, terutama tergantung pada tingkat permintaan sistem (Kandel et al., 2026).

Dalam desain tarif ToU, waktu dalam sehari atau minggu dibagi menjadi beberapa periode dengan harga yang berbeda. Struktur paling sederhana adalah dua periode: periode puncak dengan harga tinggi dan periode lembah dengan harga rendah. Struktur yang lebih kompleks dapat membagi hari menjadi tiga periode (pagi puncak, sore normal, malam lembah) atau bahkan lebih banyak periode untuk mencerminkan pola permintaan lokal

tertentu. Penelitian menunjukkan bahwa struktur empat periode (pagi puncak, siang normal, sore puncak, malam lembah) sering paling efektif dalam mendorong perubahan perilaku konsumsi yang diinginkan (Li et al., 2023).

### **8.3.2 Manfaat dan Efektivitas Tarif ToU**

Manfaat utama dari tarif ToU adalah kemampuannya untuk mendorong pergeseran beban dari periode puncak ke periode lembah melalui respons permintaan harga. Studi empiris menunjukkan bahwa penerapan tarif ToU dapat mengurangi puncak beban sebesar 15-30% tergantung pada tingkat partisipasi konsumen, elastisitas permintaan, dan struktur tarif spesifik yang digunakan (Imami & Indianto, 2025). Pengurangan puncak beban ini memiliki manfaat yang signifikan bagi sistem operator, termasuk pengurangan kebutuhan investasi dalam infrastruktur puncak, pengurangan kerugian transmisi, dan peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Manfaat tambahan dari tarif ToU termasuk sinyal harga yang lebih akurat kepada konsumen tentang biaya sebenarnya dari penyediaan energi pada waktu yang berbeda, yang dapat mendorong keputusan investasi yang lebih efisien dalam teknologi hemat energi dan penyimpanan energi. Tarif ToU juga dapat memfasilitasi integrasi energi terbarukan dengan memberikan insentif bagi konsumen untuk meningkatkan konsumsi ketika sumber terbarukan (seperti angin malam atau surya siang hari) sedang menghasilkan energi (Du et al., 2025).

### 8.3.3 Tantangan Implementasi dan Penerimaan Konsumen

Meskipun manfaatnya potensial, tarif ToU menghadapi beberapa tantangan dalam penerapannya. Tantangan pertama adalah ketersediaan infrastruktur pengukuran yang canggih, karena tarif ToU memerlukan kemampuan untuk mengukur konsumsi pada interval waktu yang spesifik. Sementara pengembangan *smart meter* telah membuat penerapan tarif ToU menjadi lebih mudah, biaya investasi dan perlindungan privasi data tetap menjadi tantangan di beberapa wilayah.

Tantangan kedua adalah penerimaan konsumen, yang sering mendapat penolakan karena ketakutan akan tagihan listrik yang lebih tinggi atau kerumitan dalam memahami struktur tarif. Studi menunjukkan bahwa penerimaan konsumen terhadap tarif ToU meningkat signifikan ketika disertai dengan edukasi yang memadai, transparansi dalam komunikasi tentang manfaat pribadi konsumen, dan *opt-in* daripada *opt-out* default (Talhar, 2019). Tantangan ketiga adalah heterogenitas pola konsumsi konsumen, di mana tarif seragam ToU mungkin tidak sesuai untuk semua konsumen, dan beberapa konsumen mungkin mengalami peningkatan biaya jika pola konsumsi mereka tidak responsif terhadap harga insentif.

### 8.3.4 Variasi Struktural dan Inovasi dalam Tarif ToU

Untuk mengatasi beberapa keterbatasan tarif ToU konvensional, berbagai variasi struktural telah dikembangkan. Variasi pertama adalah *critical peak pricing* (CPP) atau *event-based pricing*, di mana harga yang sangat tinggi dikenakan hanya pada hari-hari tertentu ketika sistem yang diharapkan akan mengalami

keadaan kritis. Pendekatan ini memberikan insentif yang lebih kuat untuk mengurangi beban pada hari-hari puncak sambil menjaga tarif yang stabil pada waktu normal. Penelitian menunjukkan bahwa CPP dapat mengurangi beban puncak sebesar 20-40% pada hari-hari acara puncak, meskipun efek pada hari-hari biasa relatif kecil (Thorve et al., 2024).

Variasi kedua adalah *waktu penggunaan musiman* atau *TOU musiman*, di mana struktur periode waktu dan tingkat harga disesuaikan dengan pola permintaan musiman. Variasi ketiga adalah *personalisasi atau waktu penggunaan dinamis*, di mana harga atau periode waktu disesuaikan berdasarkan karakteristik individu konsumen atau kondisi sistem real-time. Dengan perkembangan teknologi *smart grid* dan *advanced metering infrastruktur* (AMI), kemungkinan untuk mengimplementasikan tarif yang lebih canggih dan personal menjadi semakin nyata (Imami & Indianto, 2025).

## **8.4 Penetapan Harga Dinamis dan Real-Time**

### **8.4.1 Penetapan Harga Real-Time dan Penetapan Harga Marginal Lokasional**

Penetapan harga real-time (*real-time pricing* atau RTP) adalah struktur tarif di mana harga listrik berubah secara frekuensi, biasanya setiap jam atau setiap 15 menit, untuk mencerminkan kondisi sistem real-time dan biaya marginal dari penyediaan energi. RTP didasarkan pada konsep *locational marginal pricing* (LMP),

yang menetapkan harga di setiap node dalam jaringan berdasarkan biaya marginal lokal dari penyediaan daya dan kemacetan jaringan (Kandel et al., 2026). LPM diperoleh dari:

$$LMP = MC_{energy} + MC_{loss} + MC_{congestion}$$

Keuntungan teoritis dari RTP sangat signifikan. Pertama, RTP memberikan sinyal harga yang paling akurat kepada konsumen tentang biaya sebenarnya dari penyediaan energi pada waktu tertentu, sehingga mendorong alokasi sumber daya yang optimal dalam perspektif ekonomi global. Kedua, RTP menghilangkan kebutuhan untuk *program respon permintaan* berbasis insentif yang eksplisit, karena harga itu sendiri menjadi insentif bagi konsumen untuk mengurangi konsumsi ketika biaya tinggi. Ketiga, RTP dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi sistem dengan memberikan sinyal yang tepat tentang biaya pemanasan jaringan, kehilangan transmisi, dan kelangkaan daya (Du et al., 2025).

#### **8.4.2 Tantangan Teknis dan Perilaku Konsumen dalam RTP**

Meskipun memiliki keuntungan teoritis, RTP mengandung tantangan praktis yang signifikan. Tantangan pertama adalah kompleksitas, karena konsumen harus memenuhi harga yang berubah setiap jam atau bahkan lebih sering dan membuat keputusan konsumsi berdasarkan informasi yang kompleks ini. Penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar konsumen tidak mampu atau tidak bersedia membuat keputusan konsumsi yang didasarkan pada sinyal harga real-time yang kompleks (Singh et al., 2025).

Tantangan kedua adalah volatilitas biaya, karena RTP dapat menghasilkan tagihan listrik yang sangat fluktuatif, terutama ketika

terjadi penyiaran harga yang tajam selama periode puncak atau kondisi kritis sistem. Untuk konsumen dengan anggaran tetap, ketidakprediktabilitas ini dapat menjadi masalah serius dan dapat mengarah ke hasil yang tidak adil di mana beberapa konsumen dengan pola konsumsi yang kebetulan terjadi dengan periode harga tinggi mengalami tagihan yang jauh lebih tinggi (Jia et al., 2026).

Tantangan ketiga adalah kebutuhan untuk infrastruktur pengukuran yang sangat canggih dan komunikasi real-time antara utilitas dan konsumen untuk menerapkan RTP secara efektif. Tantangan keempat adalah dampak behavioral, karena penelitian menunjukkan bahwa banyak konsumen bereaksi kurang responsif terhadap sinyal harga real-time yang kompleks dibandingkan dengan periode harga tetap sederhana, kemungkinan karena bias kognitif dan keterbatasan rasionalitas (Abate et al., 2021).

#### **8.4.3 Pendekatan Intermediate: Penetapan Harga Puncak Kritis dan Tarif Berbasis Acara**

Untuk mengatasi tantangan RTP sambil tetap memanfaatkan manfaat dari sinyal harga dinamis, pendekatan menengah telah dikembangkan. *Critical Peak Pricing* (CPP) dan *event-based tariff* menerapkan harga yang sangat tinggi hanya pada hari-hari atau jam-jam tertentu ketika sistem yang diharapkan akan mengalami kondisi puncak atau kritis. Pendekatan ini mempertahankan efisiensi relatif dari tarif ToU sambil memberikan insentif yang lebih kuat pada periode kritis (Thorve et al., 2024).

Studi menunjukkan bahwa CPP dapat mengurangi konsumsi pada hari-hari puncak sebesar 20-40%, meskipun efek pada hari-hari

biasa minimal. Pendekatan ini juga mengatasi beberapa masalah keadilan dan prediktabilitas, karena konsumen dapat mengantisipasi hari-hari puncak beberapa hari sebelumnya melalui pengumuman utilitas. Namun, CPP masih menghadapi tantangan penerimaan konsumen dan memerlukan program komunikasi yang kuat untuk menjelaskan manfaat dan mekanisme harga kepada konsumen.

#### **8.4.4 Respons Keluhan dan Perilaku Konsumen terhadap Sinyal Harga Dinamis**

Efektivitas dari setiap struktur dinamis tarif pada akhirnya bergantung pada sejauh mana konsumen merespons sinyal harga melalui perubahan perilaku konsumsi mereka. Elastisitas permintaan terhadap harga dalam sektor listrik perumahan secara tipikal berkisar antara -0,2 hingga -0,5 dalam jangka pendek, berarti bahwa peningkatan harga sebesar 10% menghasilkan pengurangan konsumsi sebesar 2-5% dalam waktu singkat (Imami & Indianto, 2025). Elastisitas jangka panjang biasanya dua sampai tiga kali lebih tinggi, karena konsumen memiliki waktu untuk mengubah peralatan dan efisiensi rumah mereka.

Respon permintaan juga sangat heterogen antar konsumen. Konsumen tertentu (seperti pensiunan yang berada di rumah sepanjang hari) dapat merespons dengan elastisitas tinggi terhadap sinyal harga, sementara yang lain (seperti keluarga kerja dengan jadwal tetap) memiliki sinyal yang rendah. Teknologi baru seperti otomasi rumah pintar, penyimpanan energi, dan kendaraan elektrik dapat secara signifikan meningkatkan permintaan dengan

memungkinkan pengurangan beban otomatis yang dapat dioptimalkan sesuai dengan sinyal harga (Li et al., 2024).

## **8.5 Analisis Biaya dan Efisiensi Tarif Ekonomi**

### **8.5.1 Metode Perhitungan Tarif Berbasis Biaya**

Pendekatan tradisional untuk menetapkan tarif listrik adalah menggunakan peraturan *biaya layanan* atau *tarif dasar tingkat pengembalian*, di mana tarif yang ditetapkan untuk memulihkan total biaya layanan ditambah margin keuntungan yang wajar. Dalam pendekatan ini, biaya total operator utilitas dibagi menjadi beberapa kategori: biaya bahan bakar (*biaya bahan bakar*), biaya operasional dan pemeliharaan (*biaya operasi dan pemeliharaan*), biaya modal yang dialokasikan (*biaya modal yang dialokasikan*), dan kerugian sistem (Nair & Nair, 2023).

Setiap kategori biaya kemudian dialokasikan ke berbagai kategori tarif dan periode waktu berdasarkan biaya driver tertentu. Misalnya, biaya bahan bakar dialokasikan berdasarkan energi yang dikonsumsi, biaya kapasitas dialokasikan berdasarkan permintaan puncak, dan biaya transmisi dialokasikan berdasarkan lokasi dan waktu konsumsi. Metodologi alokasi biaya sangat penting karena secara langsung mempengaruhi struktur tarif akhir dan distribusi beban biaya di antara berbagai konsumen.

### 8.5.2 Levelized Cost of Electricity dan Analisis Perbandingan Teknologi

*Levelized cost of electrical* (LCOE) adalah metrik yang digunakan untuk membandingkan biaya ekonomi dari teknologi pembangkitan energi yang berbeda dengan perhitungan semua biaya selama masa hidup proyek yang didiskontokan ke nilai sekarang. LCOE dihitung sebagai total biaya diskonto selama masa hidup proyek dibagi dengan total energi yang dihasilkan selama periode yang sama (Wyszomierski et al., 2025) :

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

Analisis LCOE memungkinkan pembuat kebijakan dan investor untuk membandingkan kelayakan ekonomi dari berbagai manfaat teknologi tanpa bias terhadap umur proyek atau biaya modal yang berbeda. Misalnya, LCOE untuk panel surya diperkirakan menurun dari USD 50/MWh pada tahun 2021 menjadi USD 25/MWh pada tahun 2050, sementara untuk energi angin darat, LCOE menurun dari USD 55/MWh menjadi USD 45/MWh selama periode yang sama (Wyszomierski et al., 2025).

Analisis LCOE memberikan wawasan penting tentang kompetitivitas ekonomi teknologi energi terbarukan. Dengan penurunan biaya modal yang cepat untuk tenaga surya dan angin,

teknologi ini semakin kompetitif dengan pembangkitan berbasis bahan bakar fosil, bahkan tanpa mempertimbangkan biaya eksternal dari emisi karbon. Namun, analisis LCOE juga memiliki keterbatasan, karena tidak sepenuhnya memperhitungkan nilai kesalahpahaman sistem dan konsistensi, yang menjadi semakin penting dengan penetrasi terbarukan yang tinggi.

### **8.5.3 Biaya Sistem dan Penyimpanan Energi**

Dengan penetrasi energi terbarukan yang meningkat, biaya sistem secara keseluruhan semakin dipengaruhi oleh kebutuhan untuk penyimpanan energi dan permintaan untuk mengatasi variabilitas output terbarukan. Biaya sistem tidak hanya mencakup LCOE dari teknologi pembangkitan tetapi juga biaya infrastruktur transmisi, biaya penyimpanan energi (baik baterai, pompa air, atau teknologi lainnya), dan biaya perangkat respons permintaan dan otomatisasi.

Analisis menunjukkan bahwa sistem dengan penetrasi terbarukan tinggi (80-100%) dapat mencapai *levelized cost of energy* (LCOE sistem) sebesar USD 0,10-0,15/kWh ketika penyimpanan energi dan respon permintaan diaktifkan secara optimal (Ayed et al., 2024). Investasi dalam teknologi penyimpanan energi, terutama baterai lithium-ion yang biayanya telah menurun drastis, menjadi semakin penting untuk mengatasi frekuensi output terbarukan pada skala harian dan musiman.

### **8.5.4 Distribusi Beban Biaya dan Keadilan Tarif**

Salah satu tantangan utama dalam desain tarif adalah distribusi yang adil dari beban biaya di antara berbagai konsumen.

Metodologi alokasi biaya tradisional dapat menyebabkan hasil yang tidak adil di mana beberapa grup konsumen disubsidi oleh grup lain. Misalnya, dalam banyak sistem dengan *inclining block rates*, penggunaan rendah disubsidi oleh penggunaan tinggi, tetapi penggunaan tinggi mungkin termasuk kebutuhan dasar seperti pendingin udara atau pemanas di iklim ekstrem.

Konsep *cost causation* menekankan bahwa setiap konsumen harus membayar biaya yang mereka timbulkan dalam sistem, tidak lebih dan tidak kurang. Pendekatan ini memerlukan analisis detail tentang bagaimana setiap konsumen berkontribusi pada berbagai komponen biaya sistem (pemanasan jaringan, permintaan puncak, infrastruktur lokal, dll.) dan menetapkan tarif berdasarkan kontribusi ini (Venkatraman et al., 2020). Namun penerapan *pure cost causation pricing* dapat menghasilkan hasil yang tidak adil bagi konsumen yang secara kebetulan memiliki pola konsumsi yang menimbulkan biaya tinggi.

# **Bab 9: Investasi Proyek Energi Listrik**

---

**Ir. Levin Halim, S.T., M.T.**

## **9.1 Konsep dan Jenis-Jenis Investasi Energi Listrik**

### **9.1.1 Pengertian dan Pentingnya Investasi Energi Listrik**

Investasi proyek energi listrik merupakan suatu bentuk komitmen jangka panjang untuk mengalokasikan modal atau sumber daya finansial guna membangun, mengoperasikan, dan memelihara infrastruktur pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik. Investasi ini sangat penting dalam konteks pembangunan berkelanjutan karena energi listrik merupakan salah satu kebutuhan fundamental bagi kehidupan modern dan pertumbuhan ekonomi suatu negara (Putra & Prabowo, 2025). Di Indonesia, dengan populasi lebih dari 270 juta jiwa yang terus berkembang, kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan perkembangan teknologi. Oleh karena itu, investasi dalam proyek energi listrik menjadi prioritas strategi dalam mencapai target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025, sebagaimana ditetapkan dalam Kebijakan Energi Nasional (RUEN) (Supriadi & Sudiarto, 2025).

### **9.1.2 Jenis-Jenis Pembangkit Listrik dan Karakteristiknya**

Pembangkit listrik dapat diklasifikasikan menjadi berbagai jenis berdasarkan sumber energi yang digunakan. Pembangkit listrik yang berbasis energi terbarukan meliputi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), dan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTB) (Febriani, 2024). Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) merupakan jenis pembangkit yang paling berkembang di Indonesia karena Indonesia merupakan negara tropis yang terletak di daerah khatulistiwa dengan potensi radiasi matahari rata-rata sebesar 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Jenis pembangkit listrik yang dipilih untuk investasi harus mempertimbangkan ketersediaan sumber daya alam di lokasi proyek, kemampuan teknis implementasinya, serta kelayakan ekonomi dalam jangka panjang (Febriani & Rani, 2024).

### **9.1.3 Faktor-Faktor Penentu Keberhasilan Investasi**

Keberhasilan suatu investasi proyek energi listrik ditentukan oleh berbagai faktor penting yang harus dipertimbangkan secara cermat. Faktor-faktor tersebut mencakup aspek teknis yang meliputi kesesuaian teknologi dengan kondisi lokal, ketersediaan sumber daya alam, dan efisiensi sistem pembangkitan yang direncanakan. Aspek finansial merupakan faktor krusial yang menentukan kelangsungan proyek, meliputi kebutuhan modal investasi awal, biaya operasional dan pemeliharaan, perkiraan pendapatan dari penjualan energi listrik, dan perhitungan tingkat pengembalian investasi (IRR) (Setiawan & Hermanto, 2022). Aspek manajemen

dan organisasi juga sangat penting, termasuk kemampuan waktu dalam pelaksanaan proyek, pengalaman dalam operasional sistem energi, dan sistem pemantauan yang efektif. Selain itu, aspek lingkungan dan sosial harus dipertimbangkan untuk memastikan bahwa proyek tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat lokal.

#### **9.1.4 Peran Investasi Energi dalam Transisi Energi Berkelanjutan**

Investasi dalam proyek energi listrik terbarukan memiliki peran strategis dalam mendukung transisi energi berkelanjutan di Indonesia. Transisi dari pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil menuju pembangkit listrik berbasis energi terbarukan merupakan upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dan mengatasi dampak perubahan iklim global (Rissanti, 2026). Investasi pada PLTS, PLTB, dan pembangkit listrik terbarukan lainnya tidak hanya berkontribusi pada pengurangan emisi karbon tetapi juga meningkatkan keamanan pasokan energi dan menciptakan lapangan kerja baru di sektor energi terbarukan. Dengan meningkatkan proporsi energi terbarukan dalam bauran energi nasional, Indonesia dapat mencapai target pengurangan emisi karbon sebesar 29% pada tahun 2030 dan berkomitmen pada tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG) yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa.

## 9.2 Analisis Kelayakan Teknis Proyek Energi Listrik

### 9.2.1 Penilaian Potensi Sumber Daya Energi

Analisis kelayakan teknis proyek energi listrik dimulai dengan penilaian mendalam terhadap potensi sumber daya energi yang akan dimanfaatkan. Untuk proyek PLTS, penilaian mencakup pengukuran intensitas radiasi matahari di lokasi proyek menggunakan peralatan seperti *pyranometer*, analisis pola cuaca dan awan sepanjang tahun, serta estimasi produksi energi dengan mempertimbangkan faktor geografis dan meteorologi (Ilmiah et al., 2025). Data radiasi matahari yang dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan simulasi perangkat lunak seperti PVSyst atau HOMER untuk memprediksi energi yang dapat dihasilkan oleh sistem PLTS. Untuk proyek PLTB, analisis potensi meliputi pengukuran kecepatan angin menggunakan *anemometer*, distribusi kecepatan angin menggunakan distribusi Weibull, dan perhitungan potensi energi angin yang dapat dikonversi menjadi listrik. Selain itu, faktor-faktor lokal seperti topografi, keadaan vegetasi, dan ketinggian lokasi juga harus dipertimbangkan dalam analisis potensi sumber daya alam (Wijayanto et al., 2024).

### 9.2.2 Desain dan Spesifikasi Teknis Sistem

Setelah potensi sumber daya diketahui, tahap berikutnya adalah melakukan desain teknis dan menentukan spesifikasi komponen sistem pembangkit listrik yang akan diinstalasi. Untuk PLTS, desain meliputi penentuan kapasitas sistem (*capacity*) yang

optimal, pemilihan jenis dan jumlah panel surya (*modul fotovoltai*), pemilihan inverter, penentuan lokasi penempatan panel, kemiringan panel (*sudut kemiringan*), serta sistem penyimpanan energi jika diperlukan (Kines et al., 2024). Proses desain dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi teknis dan efektivitas biaya. Software CAD dan simulasi seperti PVSyst, Helioscope, atau HOMER Pro dapat digunakan untuk membantu dalam proses desain dan optimasi sistem. Spesifikasi teknis yang telah ditentukan harus memenuhi standar nasional (SNI) dan standar internasional yang berlaku untuk memastikan keamanan, kualitas, dan keandalan sistem pembangkit listrik yang dibangun (Winnarni & Rachmanita, 2024).

### **9.2.3 Evaluasi Kelayakan Teknis Implementasi**

Evaluasi kelayakan teknis mencakup penilaian terhadap kemampuan lokasi dan infrastruktur yang ada untuk mendukung pelaksanaan proyek. Untuk proyek PLTS atap atau rooftop, evaluasi meliputi pengecekan struktur bangunan untuk memastikan kemampuannya menopang beban panel surya, analisis *shading* atau bayangan yang dapat mengurangi energi produksi, dan perhitungan luas atap yang tersedia untuk pemasangan panel (Yuan et al., 2026). Untuk proyek PLTS ground-mounted atau PLTB, evaluasi mencakup analisis kondisi tanah, kemungkinan perubahan penggunaan lahan, dan potensi dampak lingkungan. Selain itu, evaluasi juga harus mencakup terhadap analisis jaringan listrik yang sudah ada untuk memastikan kapasitas *jaringan* yang cukup untuk menampung listrik yang diproduksi oleh proyek pembangkit listrik

baru, serta analisis terhadap kemungkinan koneksi ke jaringan listrik nasional atau penggunaan sistem *off-grid* yang terlindungi (Maghfirrahman et al., 2025).

#### **9.2.4 Perhitungan Efisiensi dan Rasio Kinerja**

Perhitungan efisiensi dan *rasio kinerja* merupakan bagian penting dari evaluasi kelayakan teknis untuk mengetahui berapa besar energi listrik yang dapat dihasilkan oleh sistem pembangkit. *Performance Ratio* (PR) didefinisikan sebagai rasio antara energi listrik yang benar-benar dihasilkan oleh sistem dengan energi listrik yang seharusnya dihasilkan berdasarkan radiasi matahari yang diterima, dengan mempertimbangkan semua faktor kerugian dalam sistem. Nilai PR yang baik untuk sistem PLTS berkisar antara 75% hingga 85%, yang menunjukkan bahwa sistem dapat mengkonversi sekitar 75% hingga 85% dari energi matahari yang diterima menjadi energi listrik yang dapat digunakan (Sutiawan et al., 2024). Perhitungan efisiensi dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai faktor kerugian seperti efisiensi panel surya, efisiensi inverter, kerugian pada kabel (*cable Loss*), dan kerugian lainnya. Software simulasi seperti PVSyst dapat menghitung PR dan efisiensi sistem berdasarkan data teknis komponen dan kondisi iklim lokal, sehingga memberikan prediksi yang akurat mengenai potensi energi yang dapat dihasilkan oleh proyek (Putra et al., 2025).

## 9.3 Analisis Kelayakan Finansial dan Ekonomi

### 9.3.1 Komponen Biaya Proyek Energi Listrik

Analisis kelayakan finansial dimulai dengan identifikasi dan perhitungan komponen biaya proyek secara menyeluruh. Komponen biaya proyek PLTS meliputi biaya investasi awal (*Capital Expenditure* atau CAPEX) yang mencakup biaya pembelian panel surya, inverter, sistem penyimpanan energi (jika ada), perangkat kontrol dan monitoring, sistem kelistrikan, biaya konstruksi, biaya perencanaan dan desain, serta biaya perizinan dan administrasi (Kartikasari et al., 2024). Selain CAPEX, biaya operasional dan pemeliharaan (*operational and maintenance* atau OPEX) juga harus diperhitungkan, meliputi biaya pemeliharaan rutin, penggantian suku cadang yang rusak, pembersihan panel surya, asuransi, dan pajak. Estimasi biaya harus dilakukan dengan cermat dengan mengumpulkan data dari berbagai pemasok dan kontraktor, serta melakukan benchmarking dengan proyek-proyek serupa yang telah dilaksanakan sebelumnya untuk memastikan estimasi biaya yang realistis dan akurat (Hiswandi et al., 2023).

### 9.3.2 Metode Perhitungan Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) merupakan salah satu metode analisis finansial yang paling penting dalam meningkatkan kelayakan investasi proyek energi listrik. NPV didefinisikan sebagai nilai sekarang dari semua aliran kas masuk (*inflow*) dikurangi dengan nilai sekarang dari semua aliran kas keluar (*outflow*) selama

umur proyek, dengan menggunakan tingkat diskonto tertentu. Rumus perhitungan NPV adalah:

$$NPV = \sum [CF_t / (1 + r)^t] - I_0$$

Di mana  $CF_t$  adalah aliran kas pada tahun ke- $t$ ,  $r$  adalah tingkat diskonto,  $t$  adalah tahun, dan  $I_0$  adalah investasi awal. Untuk proyek energi listrik, aliran kas masuk terdiri dari pendapatan penjualan, sedangkan aliran kas keluar terdiri dari biaya investasi awal, biaya operasional dan pemeliharaan, biaya penggantian komponen, dan biaya lainnya (Yunesti & Wardani, 2025). Nilai NPV yang positif menunjukkan bahwa investasi layak dilakukan karena proyek diperkirakan akan menghasilkan keuntungan yang melebihi biaya awal investasi. Tingkat diskonto yang digunakan dalam perhitungan NPV biasanya didasarkan pada biaya modal (*cost of capital*) atau MARR (*Minimum Attractive Rate of Return*) yang diharapkan oleh investor.

### **9.3.3 Metode Perhitungan Internal Rate of Return (IRR)**

Internal Rate of Return (IRR) merupakan tingkat pengembalian tahunan dari suatu investasi yang didefinisikan sebagai tingkat diskonto yang membuat nilai NPV sama dengan nol. IRR menunjukkan tingkat keuntungan tahunan yang akan diperoleh dari investasi dalam proyek energi listrik. Perhitungan IRR dilakukan dengan menyelesaikan persamaan  $NPV = 0$  untuk mencari nilai  $r$ , yang merupakan nilai IRR (Febriani & Rani, 2024). Metode perhitungan IRR dapat dilakukan secara manual menggunakan metode interpolasi linier atau menggunakan software spreadsheet seperti Microsoft Excel yang memiliki fungsi IRR bawaan. Kriteria

penerimaan atau persetujuan proyek berdasarkan metode IRR adalah: jika  $IRR > MARR$ , proyek layak untuk dilaksanakan; jika  $IRR = MARR$ , proyek berada di titik impas; jika  $IRR < MARR$ , proyek tidak layak untuk dilaksanakan. IRR juga dapat digunakan untuk membandingkan beberapa alternatif investasi dan memilih alternatif yang memberikan tingkat pengembalian tertinggi (Winnarni & Rachmanita, 2024).

#### **9.3.4 Metode Lainnya dan Analisis Sensitivitas**

Selain NPV dan IRR, terdapat metode analisis finansial lainnya yang dapat digunakan untuk mengumpulkan kelayakan investasi proyek energi listrik, yaitu *Benefit-Cost Ratio* (BCR), *Payback Period* (PP), dan *Profitability Index* (PI) (Yunesti & Wardani, 2025). BCR adalah perbandingan antara nilai sekarang dari manfaat dengan nilai sekarang dari biaya, dengan kriteria layak jika  $BCR > 1$ . PP adalah periode waktu yang diperlukan untuk mengembalikan investasi awal dari aliran kas positif yang dihasilkan oleh proyek, dengan kriteria layak jika PP lebih pendek dari umur proyek. PI adalah perbandingan antara nilai sekarang dari manfaat dengan investasi awal, dengan kriteria layak jika  $PI > 1$ . Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji seberapa perubahan variabel-variabel penting seperti harga listrik, biaya investasi, atau biaya operasional yang mempengaruhi kelayakan proyek (Kartikasari et al., 2024). Analisis sensitivitas memberikan gambaran tentang risiko investasi dan membantu pengambil keputusan dalam perencanaan strategi mitigasi risiko yang tepat.

## **9.4 Optimasi Kapasitas dan Skenario Investasi**

### **9.4.1 Penentuan Kapasitas Sistem Optimal**

Penentuan kapasitas optimal sistem pembangkit listrik merupakan keputusan penting yang mempengaruhi keseimbangan antara efisiensi teknis dan kelayakan ekonomi proyek. Kapasitas optimal harus mempertimbangkan beban listrik yang akan terisi, potensi sumber daya energi yang tersedia, serta batasan lahan atau infrastruktur yang ada. Untuk proyek PLTS atap, kapasitas optimal biasanya ditentukan dengan mempertimbangkan luas atap yang tersedia dan kebutuhan energi bangunan, dengan tujuan memenuhi sebesar mungkin kebutuhan energi dari panel surya yang terpasang (Yuan et al., 2026). Penggunaan software simulasi seperti HOMER Pro atau PVSyst dapat membantu dalam menentukan kapasitas optimal dengan melakukan analisis terhadap berbagai konfigurasi sistem dan memilih yang memberikan efisiensi terbaik. Untuk proyek PLTS skala utilitas atau proyek energi listrik besar lainnya, penentuan kapasitas harus mempertimbangkan proyeksi pertumbuhan beban listrik di masa depan, kapasitas jaringan listrik yang ada, dan target pengembangan energi terbarukan yang ditetapkan oleh pemerintah.

### **9.4.2 Analisis Berbagai Skenario Investasi**

Dalam merencanakan investasi proyek energi listrik, terhadap analisis berbagai skenario investasi sangat penting untuk mengidentifikasi strategi investasi yang paling optimal. Skenario investasi dapat berbeda dalam hal kapasitas sistem, teknologi yang

digunakan, lokasi pemasangan, atau cara pembiayaan. Misalnya, untuk proyek PLTS rooftop, dapat dianalisis beberapa skenario seperti pemasangan panel pada seluruh luas atap yang tersedia, pemasangan panel pada luas atap yang dioptimalkan berdasarkan keseimbangan antara teknis dan ekonomi, atau pemasangan panel untuk memenuhi persentase tertentu dari kebutuhan energi bangunan (Zebua et al., 2024). Setiap skenario kemudian dievaluasi dari sisi teknis dan finansial untuk menentukan skenario mana yang paling sesuai dengan tujuan investasi, baik dari segi maksimalisasi keuntungan finansial, memenuhi kebutuhan energi, atau target pengurangan emisi karbon. Hasil analisis skenario memberikan gambaran yang jelas kepada pengambil keputusan tentang trade-off antara berbagai tujuan investasi.

#### **9.4.3 Optimasi Sistem Komponen untuk Efisiensi Biaya**

Optimasi komponen sistem merupakan upaya untuk memilih kombinasi komponen yang memberikan efisiensi teknis terbaik dengan biaya terendah. Untuk PLTS, optimasi dapat dilakukan dengan membandingkan panel surya dari berbagai merek dan tipe (monokristalin, polikristalin, atau thin-film), memilih inverter dengan efisiensi tertinggi, dan menentukan konfigurasi sistem yang optimal dalam hal jumlah *string*, ukuran kabel, dan perangkat perlindungan (Sutiawan et al., 2024). Analisis cost-benefit untuk setiap pilihan komponen dapat dilakukan dengan menghitung nilai LCC (*Life Cycle Cost*) dan LCOE (*Levelized Cost of Energy*) untuk menentukan komponen yang memberikan nilai terbaik dalam jangka panjang. Strategi pembelian komponen juga dapat dioptimalkan

dengan mencari pemasok yang kompetitif, melakukan *pembelian massal* untuk mengurangi harga per unit, dan melakukan *penawaran kompetitif* dengan beberapa kontraktor untuk memastikan harga yang paling efisien.

#### **9.4.4 Studi Sensitivitas dan Analisis Risiko**

Studi sensitivitas dilakukan untuk mengidentifikasi variabel-variabel yang paling berpengaruh terhadap kelayakan investasi dan mengetahui batas-batas perubahan variabel tersebut yang masih mempertahankan kelayakan proyek. Variabel-variabel yang biasanya menjadi fokus analisis sensitivitas meliputi tarif jual listrik, biaya investasi awal, biaya operasional, dan tingkat diskonto (Afril & Batih, 2024). Analisis sensitivitas dapat dilakukan dengan metode analisis sensitivitas satu arah (mengubah satu variabel pada satu waktu) atau analisis sensitivitas dua arah (mengubah dua variabel secara bersamaan). Hasil analisis sensitivitas ditampilkan dalam bentuk tabel atau grafik yang menunjukkan perubahan NPV atau IRR terhadap perubahan variabel. Analisis risiko kemudian dilakukan untuk mengidentifikasi potensi risiko-risiko yang dapat mempengaruhi kelayakan investasi, seperti risiko pasar (fluktuasi harga energi), risiko teknis (kegagalan komponen), risiko finansial (kesulitan dalam pembiayaan), dan risiko regulasi (perubahan kebijakan pemerintah).

## **9.5 Implementasi dan Pemantauan Proyek Energi Listrik**

### **9.5.1 Perencanaan dan Persiapan Implementasi**

Implementasi proyek energi listrik memerlukan perencanaan yang matang dan persiapan yang komprehensif untuk memastikan proyek dapat berjalan sesuai dengan jadwal dan anggaran yang telah ditetapkan. Tahap perencanaan dan persiapan meliputi penetapan struktur organisasi proyek, identifikasi pemangku kepentingan yang terlibat, penyusunan rencana kerja detail, pengurusan perizinan dan persetujuan dari pihak-pihak terkait, serta penyiapan sumber daya yang diperlukan baik berupa sumber daya manusia, peralatan, maupun pendanaan (Idhan, 2025). Sebelum melakukan konstruksi, survei lapangan harus dilakukan secara menyeluruh untuk memastikan kondisi lokasi yang sesuai dengan desain yang telah dibuat. Manajemen kontrak yang baik sangat penting dalam memastikan bahwa pekerjaan dilakukan sesuai dengan spesifikasi, jadwal, dan anggaran yang telah disepakati dengan kontraktor. Sistem kendali mutu harus ditetapkan untuk memastikan bahwa setiap komponen dan pekerjaan konstruksi memenuhi standar kualitas yang telah ditetapkan.

### **9.5.2 Konstruksi dan Instalasi Sistem**

Fase konstruksi dan instalasi sistem merupakan fase yang kritis dalam implementasi proyek energi listrik. Untuk PLTS, tahap ini mencakup persiapan struktur atau pondasi untuk pemasangan panel surya, pemasangan panel surya dan sistem pemasangan,

instalasi inverter dan perangkat kontrol, pemasangan kabel dan sistem kelistrikan, serta sistem pengujian dan commissioning (Putra et al., 2025). Setiap tahapan konstruksi harus dilakukan oleh tenaga kerja yang terlatih dan berpengalaman, serta harus mengikuti standar keselamatan kerja yang berlaku. Pengujian dan commissioning adalah tahapan yang sangat penting di mana sistem dijalankan untuk pertama kalinya untuk memverifikasi bahwa semua komponen bekerja dengan baik dan sistem menghasilkan energi listrik sesuai dengan yang didesain. Dokumentasi konstruksi yang lengkap harus disimpan untuk keperluan pemeliharaan dan pemecahan masalah di masa depan.

### **9.5.3 Sistem Monitoring dan Operasional**

Setelah proyek selesai dibangun dan beroperasi, pemantauan sistem yang efektif sangat penting untuk memastikan bahwa sistem beroperasi dengan optimal dan menghasilkan energi sesuai dengan yang direncanakan. Sistem monitoring modern menggunakan teknologi Internet of Things (IoT) dan cloud computing yang memungkinkan monitoring secara real-time terhadap parameter-parameter penting seperti tegangan listrik, arus listrik, daya yang dihasilkan, kinerja komponen, dan kondisi lingkungan (Putra et al., 2025). Pemantauan data yang dikumpulkan dapat dianalisis untuk mengidentifikasi kemungkinan masalah atau penurunan kinerja yang memerlukan tindakan perbaikan. Sistem operasional harus dirancang untuk memastikan bahwa sistem pembangkit listrik dapat beroperasi dengan aman, andal, dan efisien. Standar operasional prosedur (SOP) harus ditetapkan untuk memandu operator dalam

menjalankan sistem sehari-hari, melakukan pemeliharaan rutin, dan menangani situasi darurat.

#### **9.5.4 Pemeliharaan dan Analisis Kinerja Jangka Panjang**

Pemeliharaan yang baik merupakan kunci untuk menjaga kinerja sistem pembangkit listrik dan memperpanjang umur operasional komponen. Program pemeliharaan preventif harus dilakukan secara berkala sesuai dengan rekomendasi dari pabrikan komponen, termasuk pembersihan panel surya untuk menghilangkan debu dan kotoran yang dapat mengurangi efisiensi, pengecekan kabel dan koneksi untuk memastikan tidak ada korosi atau kerusakan, dan pengecekan inverter dan perangkat kontrol untuk memastikan fungsi yang optimal (Hasriani & Virginia, 2025). Data kinerja sistem harus dicatat dan dianalisis secara berkala untuk mengidentifikasi tren kinerja, mengidentifikasi perlunya penggantian komponen, dan memverifikasi bahwa kinerja sistem masih sesuai dengan proyeksi awal atau dalam batas-batas yang dapat diterima. Laporan kinerja berkala harus disusun untuk memberikan informasi kepada pemangku kepentingan tentang bagaimana investasi mereka bekerja dan apakah investasi menghasilkan return yang sesuai dengan yang diharapkan.

# **Bab 10: Evaluasi dan Interpretasi Analisis Ekonomi Sistem Energi**

---

**Dr. Ir. Muh. Nawir Toasim, ST., MT., IPU.**

## **10.1 Prinsip-Prinsip Dasar Evaluasi Analisis Ekonomi**

### **10.1.1 Tujuan dan Ruang Lingkup Evaluasi Analisis Ekonomi**

Evaluasi dan interpretasi analisis sistem ekonomi energi merupakan tahap kritis dalam proses pengambilan keputusan investasi, di mana hasil-hasil dari berbagai perhitungan ekonomi dianalisis secara mendalam untuk memberikan wawasan yang bermakna kepada para pemangku kepentingan. (Obiabuchi & Olabisi, 2026) Tujuan utama dari evaluasi adalah untuk memahami esensi finansial dari berbagai konfigurasi sistem energi, mengidentifikasi skenario yang paling menguntungkan secara ekonomi, dan mengkomunikasikan temuan dengan cara yang transparan dan mudah dipahami oleh berbagai kelompok pengguna yang memiliki latar belakang dan kebutuhan yang berbeda.

Ruang lingkup evaluasi mencakup analisis terhadap semua indikator kinerja ekonomi (*economic performance Indicators*) yang telah dihitung, seperti *Net Present Value (NPV)*, *Internal Rate of*

*Return (IRR)*, *Levelized Cost of Energy (LCOE)*, *Benefit-Cost Ratio (BCR)*, dan periode pengembalian investasi (*payback period*). (Allah & Al-Safadi, 2025) Evaluasi juga harus mempertimbangkan sensitivitas hasil terhadap perubahan dalam parameter kunci, mengidentifikasi faktor-faktor yang paling mempengaruhi kelangsungan hidup ekonomi, dan mempertaruhkan risiko-risiko yang terkait dengan proyek energi yang diusulkan. Dengan memahami tujuan dan ruang lingkup evaluasi analisis ekonomi, perencana dan pengambil keputusan dapat merancang sistem energi yang tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga berkelanjutan dan menguntungkan secara ekonomi dalam jangka panjang.

#### **10.1.2 Indikator-Indikator Kinerja Ekonomi Utama**

Dalam memahami analisis sistem ekonomi energi, pemahaman yang komprehensif tentang berbagai indikator kinerja ekonomi sangat penting untuk interpretasi yang akurat. (Bekkouche et al., 2025) *Net Present Value (NPV)* merepresentasikan nilai bersih dari semua arus kas yang didiskonto ke nilai sekarang, dengan nilai positif menunjukkan bahwa investasi akan memberikan pengembalian yang melebihi tingkat diskonto yang ditetapkan. *Internal Rate of Return (IRR)* adalah tingkat diskonto di mana NPV sama dengan nol, memberikan indikasi tentang tingkat pengembalian yang diharapkan dari investasi.

*Levelized Cost of Energy (LCOE)* mengukur biaya rata-rata per unit energi yang diproduksi sepanjang siklus hidup sistem, memungkinkan adanya perbandingan yang adil antara teknologi dengan karakteristik yang berbeda. (Berkani et al., 2024) *Benefit-*

*Cost Ratio (BCR)* membandingkan total manfaat yang didiskonto dengan total biaya yang didiskonto, dengan nilai  $BCR > 1$  menunjukkan bahwa manfaat melebihi biaya. Periode pengembalian investasi (*payback period*) menunjukkan waktu yang diperlukan untuk menutup investasi awal melalui aliran kas positif, memberikan indikasi tentang risiko likuiditas proyek. Dalam sektor energi listrik, Levelized Cost of Energy (LCOE) juga menjadi indikator penting. LCOE mengukur biaya rata-rata produksi energi per unit listrik selama umur proyek, sehingga memudahkan perbandingan antar teknologi pembangkit. Dengan memahami dan menggunakan indikator-indikator ini secara tepat, analisis ekonomi dapat dilakukan secara komprehensif, sehingga keputusan investasi menjadi lebih rasional, terukur, dan berorientasi pada keberlanjutan.

### **10.1.3 Konteks dan Asumsi dalam Evaluasi Ekonomi**

Analisis evaluasi ekonomi sistem energi tidak dapat dilepaskan dari konteks dan asumsi-asumsi yang mendasari perhitungan ekonomis. (Manurung et al., 2025) Tingkat diskonto yang digunakan dalam perhitungan merefleksikan biaya modal dari investor dan persepsi risiko proyek, dan pemilihan tingkat diskonto yang tepat sangat penting untuk hasil evaluasi yang akurat. Asumsi tentang inflasi, eskalasi harga energi, tingkat pertumbuhan permintaan, dan masa hidup sistem komponen teknis semuanya mempengaruhi hasil perekonomian.

Konteks geografis, sosial, dan kebijakan juga mempengaruhi interpretasi hasil analisis ekonomi. (Virdy et al., 2025) Sistem energi yang layak secara ekonomis di satu lokasi mungkin tidak layak di

lokasi lain karena perbedaan dalam kondisi iklim, harga listrik lokal, ketersediaan sumber daya alam, dan kebijakan pemerintah. Evaluasi yang baik harus secara eksplisit mengidentifikasi dan menguraikan asumsi-asumsi kunci, menyajikan sensitivitas hasil terhadap perubahan dalam asumsi-asumsi tersebut, dan menjelaskan bagaimana konteks lokal mempengaruhi viabilitas ekonomi proyek. Namun demikian, karena adanya ketidakpastian, analisis sensitivitas sering dilakukan untuk menguji pengaruh perubahan asumsi terhadap hasil evaluasi. Pendekatan ini membantu mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh dan meningkatkan keandalan keputusan investasi.

Dengan mempertimbangkan konteks dan asumsi secara cermat, evaluasi ekonomi dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif dan mendukung perencanaan sistem energi yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

#### **10.1.4 Metodologi Evaluasi Komparatif**

Salah satu aspek penting dari evaluasi ekonomi adalah kemampuan untuk membandingkan berbagai alternatif konfigurasi sistem energi secara objektif dan terstruktur. (Nguyen et al., 2025) Metodologi evaluasi komparatif harus menggunakan kriteria evaluasi yang sama untuk semua alternatif, memastikan bahwa perbandingan dilakukan pada dasar yang setara, dan mengidentifikasi trade-off antara berbagai kriteria yang mungkin saling terpisah.

Teknik analisis multi-kriteria (*analisis keputusan multi-kriteria, MCDA*) dapat digunakan untuk mensintesis berbagai

dimensi kinerja (ekonomi, teknis, lingkungan, sosial) dan menghasilkan rekomendasi yang mempertimbangkan semua perspektif yang relevan. (Kumar et al., 2024) Evaluasi komparatif yang baik harus transparan dalam menunjukkan bagaimana setiap alternatif berkinerja dalam berbagai kriteria, mengidentifikasi alternatif yang memberikan kinerja terbaik dalam berbagai dimensi, dan memfasilitasi pengambilan keputusan yang diinformasikan oleh berbagai pemangku kepentingan. Selain itu, evaluasi komparatif juga mempertimbangkan aspek non-ekonomi, seperti dampak lingkungan, keandalan sistem, dan fleksibilitas operasional. Dalam sektor energi listrik, misalnya, teknologi dengan biaya lebih tinggi mungkin tetap dipilih jika memiliki emisi lebih rendah atau mendukung integrasi energi terbarukan.

Analisis sensitivitas dan skenario juga sering digunakan untuk menguji ketahanan hasil terhadap perubahan variabel kunci. Dengan demikian, keputusan yang diambil tidak hanya berdasarkan kondisi ideal, tetapi juga mempertimbangkan ketidakpastian di masa depan.

Melalui metodologi evaluasi komparatif, proses pengambilan keputusan menjadi lebih sistematis, transparan, dan berbasis data, sehingga menghasilkan pilihan investasi yang optimal dan berkelanjutan.

## 10.2 Interpretasi Hasil Analisis Ekonomi Sistem Energi

### 10.2.1 Interpretasi Viabilitas Finansial Berdasarkan Indikator Ekonomi

Interpretasi viabilitas finansial dari sistem energi memerlukan pemahaman yang nuansa tentang apa yang dinyatakan oleh berbagai indikator ekonomi dan bagaimana indikator-indikator ini saling berhubungan. (Racmanto et al., 2024) Sistem energi dengan *Net Present Value* positif menunjukkan bahwa investasi akan menghasilkan pengembalian yang melebihi biaya modal, dan nilai NPV yang lebih besar menunjukkan investasi yang lebih menarik. Namun, interpretasi tentang ukuran absolut NPV yang diperlukan untuk membuat proyek "layak" sangat tergantung pada konteks investasi dan ketersediaan modal alternatif.

*Internal Rate of Return* yang melebihi biaya modal investor menunjukkan bahwa investasi memberikan pengembalian yang memuaskan, namun interpretasi IRR juga harus mempertimbangkan risiko proyek dan penggarapan dalam estimasi arus kas di masa depan. (Alharbi, 2025) *Levelized Cost of Energy* yang lebih rendah dari tarif listrik pasar menunjukkan bahwa sistem energi terbarukan dapat kompetitif secara ekonomis dengan sumber energi konvensional, namun LCOE harus juga dievaluasi dalam konteks kebijakan energi lokal dan kontribusi sistem terhadap kinerja jaringan listrik. Namun, interpretasi indikator tidak boleh dilakukan secara terpisah. Sebuah proyek dengan NPV tinggi tetapi Payback

Period yang lama mungkin tetap memiliki risiko tertentu. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan semua indikator secara bersamaan. Selain itu, faktor eksternal seperti risiko pasar, kebijakan energi, dan ketidakpastian ekonomi juga harus diperhitungkan dalam interpretasi. Dengan analisis yang komprehensif, viabilitas finansial suatu proyek energi dapat dinilai secara lebih akurat, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang berkelanjutan dan menguntungkan.

### **10.2.2 Pola dan Tren dalam Hasil Analisis Ekonomi**

Dalam evaluasi hasil analisis ekonomi sistem energi, perhatian harus diberikan pada pola dan tren yang muncul dari data, yang dapat memberikan wawasan tentang faktor-faktor yang mendorong kelangsungan ekonomi. (Dinh et al., 2025) Perbandingan kinerja ekonomi dari berbagai konfigurasi sistem sering menunjukkan trade-off antara investasi awal dan biaya operasional jangka panjang, dengan sistem yang lebih kompleks dengan penyimpanan energi umumnya memiliki biaya awal yang lebih tinggi tetapi biaya operasional yang lebih rendah.

Analisis kinerja ekonomi sepanjang proyek menunjukkan bahwa skala proyek secara signifikan mempengaruhi biaya per unit kapasitas, dengan skala proyek besar umumnya mencapai biaya yang lebih rendah karena skala ekonomi. (Verdes, 2025) Tren dalam biaya teknologi juga menjadi faktor penting dalam interpretasi viabilitas ekonomis, dengan penurunan biaya panel surya dan baterai penyimpanan energi selama dekade terakhir secara dramatis meningkatkan viabilitas ekonomis dari sistem energi terbarukan.

Dalam sektor energi listrik, tren juga dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti harga energi, kebijakan pemerintah, dan perkembangan teknologi. Oleh karena itu, analisis tren sering dikombinasikan dengan pendekatan skenario untuk memahami kemungkinan perubahan di masa depan.

Dengan memahami pola dan tren secara menyeluruh, pengambil keputusan dapat memperoleh wawasan yang lebih mendalam mengenai kinerja ekonomi proyek, serta merancang strategi yang adaptif dan berkelanjutan.

### **10.2.3 Identifikasi Faktor-Faktor Kunci yang Mempengaruhi Viabilitas Ekonomi**

Interpretasi analisis sensitivitas dari analisis sistem ekonomi energi memungkinkan untuk mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang paling mempengaruhi kelangsungan ekonomi. (Fatah et al., 2025) Biaya investasi awal (*capital cost*) umumnya merupakan salah satu faktor paling penting, dengan pengurangan dalam biaya investasi sering kali secara signifikan meningkatkan viabilitas ekonomi, terutama untuk proyek skala kecil yang sangat sensitif terhadap perubahan biaya modal.

Harga energi dan tarif listrik juga merupakan faktor kunci yang mempengaruhi viabilitas perekonomian, dengan meningkatnya harga listrik dari jaringan meningkatkan daya saing sistem energi terbarukan. (David et al., 2026) Untuk sistem hybrid dengan penyimpanan energi, biaya dan efisiensi sistem penyimpanan merupakan faktor penting yang mempengaruhi viabilitas ekonomi secara keseluruhan, karena penyimpanan energi masih merupakan

salah satu komponen paling mahal dalam sistem energi modern. Selain aspek ekonomi, faktor teknis seperti efisiensi sistem, keandalan operasi, dan umur peralatan turut memengaruhi viabilitas proyek. Sistem dengan efisiensi tinggi cenderung menghasilkan energi lebih banyak dengan biaya lebih rendah, sehingga meningkatkan profitabilitas.

Ketidakpastian juga menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan. Oleh karena itu, analisis sensitivitas digunakan untuk mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap hasil ekonomi.

Dengan memahami dan mengidentifikasi faktor-faktor kunci ini, pengambil keputusan dapat merancang strategi yang lebih tepat dalam meningkatkan kelayakan dan keberhasilan proyek energi secara keseluruhan.

#### **10.2.4 Perspektif Jangka Panjang dalam Interpretasi Ekonomi**

Analisis interpretasi hasil ekonomi sistem energi harus mempertimbangkan perspektif jangka panjang, mengingat bahwa sistem energi beroperasi selama puluhan tahun dan biaya-manfaatnya tersebar di seluruh periode operasional yang panjang. (David et al., 2026) Analisis sensitivitas harus terjadi bagaimana perubahan dalam kondisi pasar, teknologi, dan kebijakan selama periode operasional dapat mempengaruhi kelangsungan ekonomi, dan dampaknya harus mencakup beberapa skenario berbeda yang mencerminkan gambaran tentang perkembangan di masa depan.

Dalam konteks transisi energi global dan target net-zero emisi, interpretasi ekonomi juga harus mempertimbangkan nilai dari kontribusi sistem energi terhadap pencapaian target keinginan, yang mungkin tidak sepenuhnya tercermin dalam perhitungan ekonomi yang fokus hanya pada biaya finansial. (Dinh dkk., 2025). Selain itu, proyek energi terbarukan sering kali memiliki biaya investasi awal yang tinggi tetapi biaya operasional yang rendah. Dalam perspektif jangka panjang, kondisi ini dapat memberikan keuntungan ekonomi yang lebih besar dibandingkan sistem konvensional yang bergantung pada bahan bakar fosil.

Pendekatan ini juga memungkinkan integrasi aspek keberlanjutan, seperti pengurangan emisi dan dampak lingkungan, yang semakin penting dalam perencanaan energi modern.

Dengan mengadopsi perspektif jangka panjang, interpretasi ekonomi menjadi lebih komprehensif, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang tidak hanya menguntungkan secara finansial, tetapi juga berkelanjutan dan adaptif terhadap perubahan di masa depan.

## **10.3 Analisis Sensitivitas dan Ketidakpastian Manajemen**

### **10.3.1 Tujuan dan Metodologi Analisis Sensitivitas**

Analisis sensitivitas merupakan komponen integral dari analisis evaluasi ekonomi sistem energi, memberikan gambaran tentang bagaimana perubahan dalam parameter kunci

mempengaruhi hasil ekonomi. (Pamuk & Omar, 2025) Tujuan dari analisis sensitivitas adalah untuk mengidentifikasi parameter-parameter yang paling mempengaruhi viabilitas ekonomi, mengukur besaran pengaruh perubahan parameter terhadap indikator kinerja ekonomi, dan menunjukkan rentang kemungkinan hasil ekonomis di bawah berbagai skenario.

Metodologi analisis sensitivitas dapat bervariasi mulai dari analisis satu-arah (*one-way sensitivitas analysis*) yang sederhana, di mana satu parameter diubah pada satu waktu sambil menjaga parameter lain tetap konstan, hingga analisis multi-arah yang lebih kompleks, di mana beberapa parameter berubah secara simultan untuk menghindari interaksi antar parameter. (Fatah et al., 2025) Tornado chart dan spider plot sering digunakan untuk visualisasi hasil analisis sensitivitas, menunjukkan parameter-parameter mana yang memiliki pengaruh terbesar terhadap hasil ekonomis.

Dengan demikian, analisis sensitivitas tidak hanya membantu dalam memahami risiko, tetapi juga memberikan dasar bagi pengambilan keputusan yang lebih robust. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan untuk mengantisipasi ketidakpastian dan merancang strategi mitigasi yang efektif dalam pengembangan sistem energi.

### **10.3.2 Identifikasi Parameter-Parameter Sensitif**

Dalam analisis sensitivitas, identifikasi parameter-parameter yang paling sensitif sangat penting untuk fokus upaya manajemen risiko pada area-area yang paling kritis. (Fatah et al., 2025) Untuk

sistem energi terbarukan, biaya investasi awal dan harga energi dari grid umumnya merupakan parameter yang paling sensitif, dengan variasi dalam parameter-parameter ini menghasilkan perubahan yang signifikan dalam NPV, IRR, dan LCOE.

Efisiensi sistem, tingkat degradasi komponen, dan durasi penyimpanan energi juga merupakan parameter sensitif yang penting untuk sistem hybrid dengan penyimpanan energi. (David et al., 2026) Analisis sensitivitas yang komprehensif harus diidentifikasi tidak hanya parameter-parameter individual yang sensitif tetapi juga kombinasi parameter yang dapat menghasilkan hasil yang ekstrem (sangat menguntungkan atau sangat merugikan). Selain itu, identifikasi parameter sensitif juga membantu dalam menentukan prioritas pengumpulan data dan pengendalian variabel. Misalnya, jika harga energi terbukti sangat sensitif, maka proyeksi harga harus dilakukan dengan lebih hati-hati dan berbasis data yang akurat.

Dengan mengetahui parameter-parameter kunci yang memengaruhi viabilitas ekonomi, pengambil keputusan dapat merancang strategi mitigasi risiko yang lebih efektif. Hal ini memungkinkan perencanaan sistem energi yang lebih adaptif, andal, dan berkelanjutan dalam menghadapi ketidakpastian di masa depan.

### **10.3.3 Skenario-Skenario Manajemen Ketidakpastian**

Pengembangan skenario-skenario yang berbeda merupakan alat penting untuk mengelola analisis ekonomi sistem energi dan mengidentifikasi strategi yang kuat di berbagai kondisi di masa depan. (Pamuk & Omar, 2025) Skenario biasanya mencakup

skenario optimis (dengan asumsi-asumsi yang paling menguntungkan), skenario dasar (*base case* dengan asumsi moderat), dan skenario konservatif (dengan asumsi-asumsi yang kurang menguntungkan).

Skenario tambahan juga dapat dikembangkan untuk memancarkan dampak dari perubahan signifikan kebijakan, gangguan teknologi, atau perubahan kondisi pasar yang besar. (Dinh et al., 2025) Untuk setiap skenario, indikator-indikator ekonomi kunci harus dihitung dan dibandingkan untuk menunjukkan kisaran kemungkinan hasil ekonomi dan identifikasi strategi investasi yang dapat memberikan hasil yang memuaskan di berbagai skenario. Pendekatan ini juga membantu dalam meningkatkan fleksibilitas perencanaan dan kesiapan menghadapi perubahan di masa depan. Dengan mempertimbangkan berbagai skenario, keputusan investasi menjadi lebih robust dan adaptif, sehingga mendukung keberhasilan proyek energi dalam jangka panjang.

#### **10.3.4 Penggunaan Simulasi Monte Carlo untuk Analisis Probabilistik**

Simulasi *Monte Carlo* merupakan teknik canggih yang memungkinkan analisis probabilistik dari hasil ekonomis dengan mempertimbangkan intimidasi di berbagai parameter secara bersamaan. (Kumar et al., 2024) Dalam simulasi Monte Carlo, parameter-parameter yang tidak pasti didefinisikan sebagai variabel acak dengan distribusi probabilitas tertentu (misalnya normal, seragam, atau segitiga), dan simulasi dilakukan dengan ribuan

iterasi, masing-masing menggunakan nilai-nilai acak yang berbeda untuk parameter-parameter.

Hasil dari simulasi Monte Carlo adalah distribusi probabilitas dari indikator-indikator ekonomis (seperti NPV dan IRR), yang menunjukkan nilai yang paling mungkin, rentang kemungkinan nilai, dan probabilitas dari berbagai hasil. (Kumar et al., 2024) Analisis probabilistik ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang risiko proyek daripada analisis deterministik, memungkinkan investor untuk membuat keputusan yang lebih terinformasi tentang tingkat risiko yang dapat mereka terima. Dengan pendekatan ini, analisis tidak hanya memperoleh nilai rata-rata, tetapi juga informasi mengenai risiko, seperti kemungkinan kerugian atau peluang tercapainya target keuntungan. Misalnya, probabilitas NPV bernilai positif dapat digunakan sebagai indikator tingkat keberhasilan proyek.

## **10.4 Perbandingan dan Ranking Alternatif Sistem Energi**

### **10.4.1 Metodologi Perbandingan Multi-Kriteria**

Ketika menghasilkan beberapa alternatif konfigurasi sistem energi, persaingan yang objektif dan terstruktur menggunakan metodologi analisis multi-kriteria sangat penting untuk menghasilkan rekomendasi yang kredibel. (Bekkouche et al., 2025) Metodologi analisis multi-kriteria memungkinkan pengintegrasian berbagai dimensi kinerja (ekonomi, teknis, lingkungan, sosial) ke

dalam kerangka evaluasi yang koheren, di mana setiap alternatif dievaluasi berdasarkan kinerja di berbagai kriteria yang telah ditentukan sebelumnya.

Langkah-langkah dalam analisis multi-kriteria termasuk pengumpulan semua kriteria evaluasi yang relevan, penentuan bobot relatif dari setiap kriteria yang mencerminkan preferensi pengambil keputusan, skor setiap alternatif berdasarkan kinerja di setiap kriteria, dan sintesis skor untuk menghasilkan peringkat keseluruhan dari alternatif. (Manurung et al., 2025) Transparansi dalam bobot dan metodologi scoring sangat penting untuk memastikan bahwa hasil evaluasi dapat diterima oleh berbagai pemangku kepentingan. Keunggulan metodologi ini adalah kemampuannya dalam mengintegrasikan berbagai aspek yang berbeda dalam satu kerangka analisis. Hal ini sangat penting dalam sistem energi yang kompleks, di mana keputusan harus mempertimbangkan trade-off antara biaya, kinerja, dan keberlanjutan.

Dengan menggunakan pendekatan multi-kriteria, pengambil keputusan dapat memilih alternatif sistem energi yang paling optimal secara menyeluruh, bukan hanya berdasarkan satu indikator tertentu.

#### **10.4.2 Teknik-Teknik Scoring dan Weighting**

Berbagai teknik dapat digunakan untuk menentukan bobot relatif dari berbagai kriteria analisis dalam multi-kriteria, termasuk *Analytical Hierarchy Process (AHP)*, *Technique for Order Preference by Kemiripan dengan Solusi Ideal (TOPSIS)*, dan metode lainnya. (Pasangkunan et al., 2024) Metode AHP memungkinkan

pengambil keputusan secara sistematis membandingkan pasangan berbagai kriteria untuk menentukan bobot relatif mereka, sementara TOPSIS memberikan alternatif berdasarkan jaraknya dari solusi ideal dan solusi kasus terburuk.

Scoring alternatif berdasarkan kinerja di berbagai kriteria dapat dilakukan menggunakan skala rating yang konsisten (misalnya skala 1-10) yang diterapkan secara konsisten di semua alternatif. (Nguyen et al., 2025) Normalisasi skor dari berbagai kriteria dengan satuan yang berbeda dapat dilakukan sebelum sintesis untuk memastikan bahwa kriteria dengan nilai absolut yang lebih besar tidak mendominasi hasil analisis.

Keunggulan teknik ini adalah kemampuannya dalam mengintegrasikan berbagai faktor yang bersifat heterogen ke dalam satu kerangka evaluasi yang konsisten. Dengan demikian, teknik scoring dan weighting membantu menghasilkan keputusan yang lebih transparan, rasional, dan sesuai dengan tujuan perencanaan sistem energi yang berkelanjutan.

#### **10.4.3 Analisis Trade-off dan Solusi Kompromi**

Dalam banyak kasus, tidak ada satu alternatif tunggal yang memiliki kinerja terbaik pada semua kriteria, sehingga diperlukan analisis trade-off yang mendalam untuk mengidentifikasi solusi kompromi yang dapat diterima oleh berbagai pemangku kepentingan. (Dinh et al., 2025) Kurva Pareto dapat digunakan untuk mengidentifikasi set solusi Pareto-optimal, di mana peningkatan dalam satu kriteria hanya mungkin dicapai dengan mengorbankan kinerja dalam kriteria lain.

Analisis *trade-off* harus secara eksplisit menunjukkan pertukaran yang terlibat (misalnya peningkatan investasi awal versus pengurangan biaya operasional), membantu pengambil keputusan memahami penerapan pemilihan alternatif yang berbeda. (Kumar et al., 2024) Solusi kompromi yang direkomendasikan harus memberikan kinerja yang baik di berbagai kriteria, bukan hanya di satu atau dua kriteria saja, dan harus dapat dipertahankan ketika nilai-nilai dari berbagai pemangku kepentingan dipertimbangkan. Dengan memahami dan menerapkan analisis *trade-off*, pengambil keputusan dapat membuat pilihan yang lebih bijaksana dan realistis. Pendekatan ini sangat penting dalam perencanaan sistem energi modern yang kompleks, di mana keberlanjutan dan efisiensi harus dicapai secara bersamaan.

#### **10.4.4 Presentasi Hasil Evaluasi kepada Berbagai Pemangku Kepentingan**

Komunikasi hasil evaluasi analisis ekonomi dan perbandingan sistem energi alternatif kepada berbagai pemangku kepentingan dengan latar belakang dan kebutuhan yang berbeda memerlukan presentasi yang disesuaikan dan transparan. (Manurung et al., 2025) Bagi investor dan lembaga keuangan, presentasi harus fokus pada indikator-indikator kinerja finansial seperti NPV, IRR, dan periode pengembalian investasi, serta analisis risiko yang menunjukkan volatilitas dari potensi hasil-hasil.

Untuk pembuat kebijakan nasional dan administrator publik, presentasi harus menekankan dampak lingkungan dan sosial dari berbagai alternatif, kontribusi terhadap target kemiskinan, dan

pemberdayaan untuk ketahanan energi dan kemandirian energi. (Fatah et al., 2025) Bagi komunitas lokal, presentasi harus fokus pada dampak lokal dari proyek energi, peluang kerja yang diciptakan, dan potensi bagi pemberdayaan ekonomi lokal. Visualisasi seperti grafik, grafik, dan dashboard dapat membantu mengkomunikasikan hasil evaluasi yang kompleks dengan cara yang mudah dipahami oleh berbagai kelompok pengguna. Selain itu, komunikasi dua arah perlu difasilitasi untuk memberikan kesempatan bagi pemangku kepentingan dalam memberikan masukan atau klarifikasi.

Dengan pendekatan ini, hasil evaluasi tidak hanya menjadi dokumen teknis, tetapi juga alat komunikasi strategis yang mendukung kolaborasi dan pengambilan keputusan yang lebih efektif dan inklusif dalam pengembangan sistem energi.

## **10.5 Rekomendasi dan Implikasi Kebijakan dari Analisis Ekonomi**

### **10.5.1 Memikirkan Rekomendasi Investasi Berdasarkan Evaluasi Ekonomi**

Rekomendasi analisis investasi yang dihasilkan dari evaluasi sistem ekonomi energi harus didasarkan pada hasil evaluasi yang komprehensif, analisis risiko yang menyeluruh, dan pertimbangan terhadap preferensi dan kendala dari investor. (Alharbi, 2025). Rekomendasi harus secara eksplisit menyatakan alternatif konfigurasi sistem energi yang direkomendasikan, alasan di balik

rekomendasi (misalnya NPV tertinggi, IRR tertinggi, risiko terendah), dan kondisi-kondisi atau asumsi-asumsi di mana rekomendasi ini berlaku.

Rekomendasi juga harus mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang dapat mempengaruhi viabilitas ekonomi dari sistem yang direkomendasikan, dan menyarankan langkah-langkah mitigasi risiko atau strategi adaptif yang dapat diambil jika kondisi di masa depan berbeda dari asumsi-asumsi yang digunakan dalam analisis. (Verdes, 2025). Rekomendasi yang baik juga harus mempertimbangkan mempertimbangkan dan reversibilitas investasi, serta potensi untuk penyesuaian atau peningkatan sistem di masa depan ketika teknologi atau kondisi pasar berubah.

Dalam merumuskan rekomendasi, faktor eksternal seperti kebijakan pemerintah, insentif energi terbarukan, serta tren pasar energi juga perlu diperhatikan. Hal ini penting agar investasi yang dilakukan tidak hanya menguntungkan secara ekonomi, tetapi juga selaras dengan arah kebijakan dan perkembangan sektor energi.

Dengan pendekatan yang komprehensif, rekomendasi investasi dapat menjadi dasar yang kuat dalam pengambilan keputusan strategis, sehingga mendukung pengembangan sistem energi yang efisien, andal, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

#### **10.5.2 Implikasinya terhadap Kebijakan Energi dan Pengaturan Tarif**

Hasil dari analisis evaluasi sistem ekonomi energi memiliki makna penting bagi kebijakan energi dan pengaturan tarif listrik. (Shani & B., 2024) Jika analisis menunjukkan bahwa sistem

energi terbarukan tidak layak secara ekonomis pada tarif listrik saat ini, kebijakan seperti subsidi, insentif fiskal, atau mekanisme feed-in tariff yang lebih menguntungkan dapat diperlukan untuk membuat investasi dalam energi terbarukan menarik bagi investor.

Analisis sensitivitas dapat memberikan wawasan tentang tingkat tarif listrik atau subsidi yang diperlukan untuk membuat proyek energi terbarukan layak secara ekonomis, membantu pembuat kebijakan dalam menentukan tingkat yang tepat dari dukungan kebijakan. (Pamuk & Omar, 2025) Pengaturan tarif listrik yang mencerminkan biaya penuh dari produksi energi (termasuk biaya lingkungan dan kesehatan) dapat membantu menciptakan kondisi pasar yang lebih setara untuk energi terbarukan relatif terhadap sumber energi konvensional. Namun demikian, pengaturan tarif dan kebijakan energi juga harus mempertimbangkan aspek sosial, seperti keterjangkauan bagi masyarakat. Oleh karena itu, diperlukan keseimbangan antara efisiensi ekonomi dan keadilan sosial.

Dengan demikian, analisis ekonomi menjadi alat penting dalam mendukung kebijakan energi yang rasional, transparan, dan berkelanjutan.

### **10.5.3 Strategi Pembiayaan dan Perencanaan Investasi Jangka Panjang**

Analisis evaluasi sistem ekonomi energi memiliki makna penting bagi strategi pembiayaan dan perencanaan investasi jangka panjang. (Allah & Al-Safadi, 2025) Proyek energi dengan NPV tinggi dan IRR yang memuaskan mungkin dapat dibiayai melalui

pembiayaan konvensional dari lembaga keuangan, sementara proyek dengan profil risiko lebih tinggi mungkin memerlukan dukungan pembiayaan yang lebih inovatif, seperti pembiayaan blended atau pembiayaan bertahap.

Perencanaan investasi jangka panjang harus mempertimbangkan jalur evolusi biaya teknologi yang diproyeksikan, penentuan waktu pengembangan proyek untuk mengoptimalkan biaya, dan diversifikasi strategi untuk mengurangi risiko portofolio investasi energi. (Kumar et al., 2024) Analisis evaluasi ekonomi yang tepat dapat membantu mengidentifikasi “window opportunity” di mana proyek energi terbarukan dapat menjadi perekonomian tanpa dukungan kebijakan yang besar, memungkinkan perencanaan yang lebih strategis dari transisi energi.

Dengan perencanaan dan strategi pembiayaan yang matang, investasi di sektor energi dapat dilakukan secara lebih terarah, efisien, dan berkelanjutan, sehingga mampu mendukung pertumbuhan ekonomi sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan.

#### **10.5.4 Pemantauan dan Evaluasi Kinerja Pasca-Implementasi**

Analisis evaluasi sistem ekonomi energi tidak berakhir dengan pengambilan keputusan investasi, tetapi harus dilanjutkan dengan pemantauan dan evaluasi kinerja pasca implementasi untuk memverifikasi bahwa kinerja aktual sesuai dengan ekspektasi yang diproyeksikan. (David et al., 2026) Sistem monitoring harus melacak kinerja teknis (produksi energi, efisiensi, siluet), kinerja finansial (pendapatan, biaya operasional, aliran kas), dan kinerja lingkungan (emisi, konsumsi udara) dari proyek energi.

Evaluasi pasca-implementasi harus membandingkan hasil aktual dengan proyeksi yang digunakan dalam analisis ekonomi, mengidentifikasi penyebab dari perbedaan yang signifikan (misalnya proyeksi sumber daya yang tidak akurat, biaya operasional yang lebih tinggi dari perkiraan), dan memberikan pembelajaran untuk proyek-proyek energi di masa depan. (Fatah et al., 2025) Hasil dari monitoring dan evaluasi pasca-implementasi dapat mengikrarkan parameter-parameter asumsi yang digunakan dalam model evaluasi ekonomi untuk proyek-proyek di masa depan, meningkatkan akurasi dari proyeksi ekonomis.

Dengan demikian, pemantauan dan evaluasi pasca-implementasi tidak hanya memastikan keberhasilan proyek yang sedang berjalan, tetapi juga menjadi dasar pembelajaran berkelanjutan dalam pengembangan sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

# Profil Penulis

---



Ir. Levin Halim, S.T., M.T. lahir di Bandung pada 28 Juli 1992. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Tenaga Listrik pada tahun 2014 dan Magister Teknik Elektro pada tahun 2015 di Institut Teknologi Bandung (ITB). Saat ini, ia sedang menempuh pendidikan S3 (Doktor) di STEI ITB. Levin adalah dosen tetap di Program

Studi Sarjana Teknik Elektro (Konsentrasi Mekatronika), Fakultas Teknologi Rekayasa, Universitas Katolik Parahyangan (UNPAR). Ia memiliki pengalaman lebih dari 9 tahun sebagai pengajar dan pembimbing akademik di bidang sistem tenaga, integrasi energi terbarukan, elektronika daya, dan kewirausahaan teknologi. Selain itu, ia juga aktif dalam riset dan publikasi, serta terlibat dalam program pelatihan dan pengabdian masyarakat terkait energi surya, kualitas daya, dan aplikasi kecerdasan buatan (AI) pada sistem energi. Pesannya untuk pembaca adalah, "Di energi listrik, keputusan teknik yang tampak kecil sering berujung pada biaya yang besar. Bagian ini menekankan cara berpikir biaya secara disiplin, memahami jenis biaya, perilaku biaya, dan asumsi yang menyertainya, agar analisis ekonomi pada bab-bab berikutnya tidak berdiri di atas pemahaman yang keliru."



Ade Irawaty Tolago, ST., MT. lahir di Ujung Pandang pada 14 Februari 1975. Saat ini, ia berdomisili di Jl. Selayar No A3/5, Kelurahan Pulubala, Kecamatan Kota Tengah, Kota Gorontalo. Ia memiliki hobi memasak dan percaya pada kekuatan impian dan usaha. Pesannya untuk pembaca adalah, "Teruslah bermimpi dan berusaha, karena setiap langkah kecil yang kamu ambil mendekatkan pada tujuan besar."



Makassar.

Ir. Andi Abdul Halik Lateko, Ph.D. lahir di Pare-Pare pada 27 September 1974. Ia menyelesaikan pendidikan S3 (Doktoral), meskipun informasi lebih lanjut mengenai detail pendidikan dan spesialisasi tidak disebutkan. Saat ini, ia berprofesi sebagai dosen di Universitas Muhammadiyah



Prof. Dr. Ir. Sudirman Syam, ST, MT, IPM, lahir di Bone pada 11 Februari 1967. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Elektro di Universitas Muhammadiyah Ujung Pandang (UMI) pada 1995, kemudian melanjutkan pendidikan Magister Teknik Elektro di Universitas Hasanuddin (UNHAS) Makassar pada 2009. Ia meraih gelar Doktor di bidang Teknik Mesin di Universitas Brawijaya Malang pada 2019. Sejak 1989, ia berprofesi sebagai dosen tetap di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana. Pengalamannya mencakup banyak penelitian, termasuk sebagai ketua dan anggota dalam berbagai proyek penelitian yang didanai oleh DIKTI, seperti penelitian mengenai sistem penjadwalan ekonomis pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) untuk mengoptimalkan penggunaan bahan bakar, pengembangan turbin Savonius terintegrasi dengan generator aksial tanpa roda gigi, serta eksperimen dan pengembangan motor magnet free energy (Fuelless Engine). Ia juga aktif dalam penelitian dan pengembangan dalam bidang energi dan teknologi, dengan berbagai penelitian yang didanai oleh Hibah Bersaing-DIKTI, Hibah Unggulan Perguruan Tinggi, dan DIPAU-Undana. Pesannya untuk pembaca adalah, "Semoga buku ini dapat meningkatkan pengetahuan, khususnya bagi mereka yang bergelut di bidang Teknik Elektro."



Prof. Dr. Ir. Machmud Effendy, ST., M.Eng. lahir di Malang pada 15 Juni 1974. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Elektro (Konsentrasi Elektronika) di Universitas Muhammadiyah Malang (UMM) pada 1998, kemudian meraih gelar Magister

Teknik Mesin (Konsentrasi Mikrohidro) di Universitas Gadjah Mada pada 2009. Ia menyelesaikan pendidikan Doktorat (S3) di Teknik Elektro (Konsentrasi Konversi Energi) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada 2023. Sejak 1989, ia berprofesi sebagai dosen tetap di Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang (UMM). Dalam pengalaman profesionalnya, ia telah terlibat dalam berbagai proyek besar, seperti membuat Feasible Study (FS), Detil Engineering Design (DED), dan Konstruksi PLTMH 25 kW Sumber Maron-Kab. Malang, FS dan DED PLTMH 80 kW Sengkaling-2 UMM, FS dan DED PLTMH 2 x 600 kW Buleleng-Sulawesi Tengah, serta berbagai proyek PLTS lainnya di Malang dan sekitarnya. Pesannya untuk pembaca adalah, "Penulis berharap buku ini dapat menjadi salah satu referensi yang membantu mahasiswa, dosen, peneliti, maupun praktisi dalam memperdalam wawasan di bidang Ekonomi Teknik dan Energi Listrik. Semoga pengetahuan yang diperoleh dari buku ini dapat menjadi bekal untuk mengembangkan teknologi energi yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan demi kemaslahatan umat."



Dr. Ir. Muhammad Yusan Naim, MSc. lahir di Makassar pada 28 Juni 1965. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Universitas Hasanuddin pada tahun 1988, kemudian melanjutkan pendidikan Magister (S2) di Institut Teknologi Bandung pada 1995. Ia meraih gelar Doktorat (S3) di

Universitas Brawijaya Malang pada tahun 2020. Sejak 1989 hingga saat ini, ia berprofesi sebagai dosen tetap di Universitas Muslim Indonesia (UMI). Pesannya untuk pembaca adalah, "Baca buku ini dan amalkan kepada siapapun, dan dimanapun serta kapanpun dalam menggapai keberkahan ilmu."



Ir. Suparman, S.T., M.T. lahir di Cismur pada 10 Mei 1977. Ia memulai pendidikan dasarnya di SD-INPRES UNIT II A Desa Cemara Jaya Kecamatan Wasile, Kabupaten Halmahera Timur, lulus pada tahun 1991. Selanjutnya, ia melanjutkan ke SMP Muhammadiyah Soa-Sio Tidore, Kota Tidore Kepulauan, lulus pada 1994, dan kemudian menempuh pendidikan di SMA Negeri 1 Soa-Sio Tidore, Kota Tidore Kepulauan, lulus pada 1997. Ia menyelesaikan Pendidikan Diploma III di Politeknik Negeri Manado, Jurusan Teknik Elektro, lulus pada 2000. Kemudian, ia melanjutkan studi ke Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro Universitas Khairun dan lulus pada 2011. Ia juga menyelesaikan studi Magister Teknik di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang pada 2017. Penulis saat ini sedang menempuh Pendidikan Profesi Insinyur di Fakultas Teknik Universitas Khairun, yang diperkirakan selesai pada 2025. Dalam pengalamannya, ia menjadi anggota asosiasi Persatuan Insinyur Indonesia dan anggota FORTEI. Ia memulai kariernya di Universitas Khairun pada 2003 sebagai CPNS di Program Studi Teknik Elektro sebagai tenaga Laboran & Teknisi, hingga 2023. Pada tahun 2023, ia diangkat menjadi Dosen Tetap di Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Khairun, dan pada 2026, ia akan diangkat menjadi Kepala Laboratorium Teknik Tenaga Listrik di universitas yang sama.

Pesannya untuk pembaca adalah, "Energi listrik adalah nadi peradaban modern, namun untuk menggerakkannya diperlukan perhitungan ekonomi yang matang. Buku 'Ekonomi Teknik dan Energi Listrik' ini adalah kumpulan pemikiran dan analisis mengenai bagaimana membuat proyek-proyek ketenagalistrikan tidak hanya dapat diandalkan, tetapi juga menguntungkan dan berkelanjutan. Saya berharap buku ini dapat menjadi referensi utama Anda dalam memahami seluk-beluk biaya, manfaat, dan risiko dalam industri energi. Selamat membaca, semoga setiap halaman yang Anda baca menambah wawasan dan keahlian Anda. Jauh, pemahaman tentang kinerja transmisi adalah kunci untuk membangun grid listrik masa depan yang lebih tangguh dan berkelanjutan. Selamat menelusuri setiap kilometer jaringan ini. Semoga buku ini menjadi pencerah dalam perjalanan profesional Anda."



Ir. Yulianto La Elo, S.T., M.T., IPM. lahir di Neira pada 21 Juli 1990. Ia menyelesaikan pendidikan Magister Teknik Elektro di Universitas Indonesia. Saat ini, ia berprofesi sebagai dosen di Politeknik Negeri Fakfak. Pesannya untuk pembaca adalah, "Membuat lampu menyala itu urusan teknis, tapi memastikan sistemnya berkelanjutan dan efisien adalah urusan ekonomi. Buku ini hadir untuk menjembatani keduanya. Setiap keputusan teknik dalam sistem tenaga listrik selalu memiliki nilai investasi yang harus terukur. Selamat mengeksplorasi strategi di balik angka-angka energi, semoga bermanfaat untuk studi dan karier Anda."



Dr. Ir. Muh. Nawir Toasim, ST., MT., IPU, lahir di Pinrang pada 21 Januari 1970. Saat ini, ia berdomisili di BTN Ranggoong Permai Blok A10/1 RT.06 RW.04, Kel. Bangkala, Kec. Manggala, Kota Makassar, 90235. Ia menyelesaikan pendidikan S1 di Teknik Elektro, Universitas Muslim Indonesia, Makassar, kemudian melanjutkan S2 di Teknik Elektro, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Pada S3, ia meraih gelar Ilmu Lingkungan (Interdisipliner) di Universitas Brawijaya Malang. Saat ini, ia berprofesi sebagai dosen di Teknik Elektro Universitas Muslim Indonesia Makassar. Pesannya untuk pembaca adalah, "Melalui buku ini, pembaca akan diajak untuk mengeksplorasi berbagai konsep dasar hingga pendekatan analitis yang lebih kompleks, mulai dari evaluasi kelayakan investasi, analisis biaya dan manfaat, hingga pengelolaan risiko dan ketidakpastian. Selain itu, buku ini juga membahas bagaimana hasil analisis ekonomi dapat diinterpretasikan dan digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan strategis, baik pada tingkat proyek maupun kebijakan. Penulis berharap buku ini tidak hanya bermanfaat bagi mahasiswa sebagai bahan pembelajaran, tetapi juga bagi praktisi, peneliti, dan pengambil kebijakan yang terlibat dalam pengembangan sistem energi. Dengan pendekatan yang sistematis dan aplikatif, buku ini diharapkan mampu menjembatani antara teori dan praktik dalam bidang ekonomi teknik dan energi listrik."

# Daftar Pustaka

---

Abduh, M. (2023). Analisis life cycle cost (LCC) dan kelayakan investasi proyek pembangunan gedung asrama putra Politeknik di Bali. *Jurnal Ilmu Sosial, Humaniora, dan Pendidikan*, 3(1), 1-15.

Accda, A., Goldoust, A., Hojjat, M., & Seyyedmahdavi, S. (2024). Analisis risiko desain optimal VPP dalam mode pencari risiko/penghindar risiko menggunakan IGDT dan mempertimbangkan ketidakpastian angin, surya, dan beban. *Energy Reports*, 8858389.

<https://doi.org/10.1155/er/8858389>

Adedeji, EA, & Ituma, NK (2020). Analisis titik impas sebagai alat manajemen untuk pengambilan keputusan di Babcock University Water Corporation. *European Journal of Business and Management*, 12(21), 1–15.

<https://doi.org/10.7176/ejbm/12-21-18>

Adeleru, PI, & Adebayo, I. (2024). Analisis tekno-ekonomi dan lingkungan dari sistem energi terbarukan hibrida off-grid untuk elektrifikasi pedesaan. *Journal of Advances in Environmental and Health Research*, 4202.81, 0460.

<https://doi.org/10.36108/laujet/4202.81.0460>

Adi, TJW, & Rianto, H. (2024). Analisa keekonomian dan optimalisasi sistem pembangkit listrik hybrid tenaga diesel,

tenaga surya dan tenaga hidrogen di pulau Sebesi Provinsi Lampung. *Penelitian Jurnal Aksara*, 8(11), 2348.

Adzlin, A., Sebayang, AH, & Harjon, A. (2023). Analisis biaya siklus hidup dan periode pengembalian investasi turbin angin 12-kW untuk stasiun pangkalan telekomunikasi jarak jauh. *American International Journal of Sciences and Technology*, 12(2), 33010.

Ahmad, F., Ashraf, I., Iqbal, A., & Bilal, M. (2024). Analisis biaya-manfaat fasilitas parkir kendaraan listrik yang terintegrasi dengan sumber energi terbarukan dan penyimpanan baterai. *Pertemuan Tahunan IEEE Industrial Electronics Society 2024*, 1195, 57-63.

<https://doi.org/10.1109/IECON55916.2024.10905570>

Al-Abed Allah, M., & Al-Safadi, M. (2025). Analisis tekno-ekonomi komparatif teknologi PV surya dan CSP dengan dan tanpa penyimpanan termal dan baterai di kota-kota Arab Saudi. *Jurnal Energi Terbarukan dan Lingkungan*, 28(2), 1500. <https://doi.org/10.54966/jreen.v28i2.1500>

Alvriyanto, BJ, Hardianto, T., Saleh, A., Widjanarko, W., & Gozali, RM (2024). Studi teknis dan ekonomis PLTS atap kapasitas 38,2 KWp. *Jurnal Rekayasa Energi Terapan*, 10(3), 46617.

Arjunan, K. (2022). Metode baru untuk memperkirakan NPV dan IRR dari jadwal amortisasi modal dan keunggulan metode baru tersebut. *Jurnal Akuntansi, Bisnis dan Keuangan Australasia*, 16(6), 3-28.

<https://doi.org/10.14453/aabfj.v16i6.03>

- Astitasari, RK (2023). Analisis kelayakan tekno-ekonomi PLTS on-grid pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung. *Jurnal Inovasi Teknik Energi Terpadu*, 13(3), 7977.
- Astuti, S., Mansyur, A., Abdullah, A., Lawelle, SA, & Sidiq, A. (2024). Model keputusan investasi pengembangan penangkapan ikan rajungan di Desa Bungin Permai Kecamatan Tinanggea. *Jurnal Sosial Ekonomi Perikanan*, 9(4), 92. <https://doi.org/10.33772/jsep.v9i4.92>
- Bai, A., Balogh, P., Nagy, A., Cséd, Z., Sinros-Szab, B., Pintr, G.,... & Gabnai, Z. (2023). Evaluasi ekonomi sistem pembangkit listrik menjadi biomethane berkapasitas 1 MWel. *Energies*, 16(24), 8009. <https://doi.org/10.3390/en16248009>
- Bashir, N., Lawal, R., & Adeyemi, G. (2025). Tren dan hubungan antara pasokan, konsumsi, dan tarif listrik. *Jurnal Studi Ekonomi dan Manajemen Amerika Latin*, 10(1), 6. <https://doi.org/10.70118/lajems-10-1-2025-06>
- Bekkouche, A., Benidir, F., Lekbir, A., Samatar, AM, & Mekhilef, S. (2025). Desain dan analisis optimal sistem energi terbarukan hibrida yang terhubung ke jaringan untuk elektrifikasi kampus yang berkelanjutan dan hemat biaya. *Energy Science & Engineering*, 70259. <https://doi.org/10.1002/ese3.70259>
- Berkani, L., Fodhil, F., Nacer, T., Alliche, Z., & Nacer, S. (2024). Analisis kelayakan tekno-ekonomi sistem energi terbarukan hibrida untuk fasilitas industri agribisnis di

Aljazair. *Konferensi Internasional ke-3 tentang Energi Bersih dan Sistem Kelistrikan 2024*, 62477, 10851012. <https://doi.org/10.1109/ECTE-Tech62477.2024.10851012>

Biancardi, A., D'Adamo, I., Gastaldi, M., & Ierfone, FP (2026). Energi terbarukan sebagai pendorong ketahanan jaringan listrik: Bukti dan implikasi kebijakan. *Jurnal Internasional Ekonomi dan Kebijakan Energi*, 22654. <https://doi.org/10.32479/ijeep.22654>

Bistline, JET (2021). Pentingnya resolusi temporal dalam pemodelan dekarbonisasi mendalam sektor tenaga listrik. *Environmental Research Letters*, 16(7), 073001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac10df>

Blokus-Dziula, A., Dziula, P., Kamedulski, B., & Michalak, P. (2023). Biaya operasi dan pemeliharaan sistem pengelolaan air: Analisis dan optimasi. *Air*, 15(17), 3053. <https://doi.org/10.3390/w15173053>

Boltrük, E., & Haktanır, E. (2023). Analisis biaya-manfaat fuzzy terurai dan aplikasinya pada pemilihan robot oftalmologi. *Jurnal Internasional Studi Teknik dan Teknologi*, 10(1), 1-15. <https://doi.org/10.1080/0013791x.2023.2179709>

Boltrük, E., & Şeker, Ş. (2023). Metode analisis nilai sekarang fuzzy sferis untuk analisis investasi rumah sakit darurat. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(4), 2042-2060. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3190914>

- Budi, RFS, Birmano, MD, & Amitayani, ES (2021). Pemilihan pembangkit listrik tenaga nuklir skala besar berdasarkan aspek ekonomi dan keandalan dalam sistem tenaga listrik Indonesia. *Jurnal Internasional Ekonomi dan Keuangan*, 11(1), 107.
- Bullard, SH, & Gunter, JE (2000). Menyesuaikan tingkat diskonto untuk pajak penghasilan dan inflasi: Proses tiga langkah. *Southern Journal of Applied Forestry*, 24(4), 193-195. <https://doi.org/10.1093/sjaf/24.4.193>
- Chen, J., Lv, H., Ding, L., Zhu, S., Zhou, Y., & Lin, X. (2025). Analisis ekonomi sistem berbasis energi terbarukan dengan mempertimbangkan variasi teknologi diversifikasi energi hidrogen. Makalah dipresentasikan pada Konferensi Internasional IEEE 2025 tentang Penelitian dan Aplikasi Tenaga dan Energi.
- Chen, S. (2025). Analisis sensitivitas nilai sekarang bersih (NPV): Memahami risiko dalam proyek investasi. *Asian Journal of Economics, Business and Accounting*, 19(1), 1–18. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2024.19301>
- Ciputra, SB, Hasbi, NF, Farich, A., & Valentine, A. (2022). Hubungan status demografi, komorbiditas dengan KIPi pasca vaksin COVID-19 pada tenaga kesehatan. *Jurnal Ilmu Kesehatan Keperawatan*, 11(1), 725.
- Colombo, C., Longo, M., & Yaici, W. (2025). Strategi implementasi mikrogrid yang dioptimalkan: Sebuah model untuk ESS yang efisien energi dan keuntungan. Makalah

- dipresentasikan pada Konferensi IEEE 2025 tentang Elektronik Daya dan Energi Listrik.
- Cristea, M., Cristea, C., Trnovan, R., Botezan, A., Erban, F., & Balog, E. (2024). Analisis biaya penyimpanan yang dirata-ratakan untuk prosumer - studi kasus: Rumania. Makalah dipresentasikan pada Konferensi Internasional IEEE tentang Sistem Tenaga Listrik 2024.
- D'Adamo, I., Gastaldi, M., Ierfone, FP, & Biancardi, A. (2026). Energi terbarukan sebagai pendorong ketahanan jaringan listrik: Bukti dan implikasi kebijakan. *Jurnal Internasional Ekonomi dan Kebijakan Energi*, 22654.
- Dalimunthe, YP, & Susilawati, S. (2022). Implementasi kebijakan vaksinasi COVID-19 di Kota Medan menggunakan teori Edward III. *Florona: Jurnal Penelitian Kebijakan Publik*, 1(2), 300.
- Damanik, DYA (2024). Implementasi biaya siklus hidup pada bangunan terminal bus. *Jurnal Teknik Sipil*, 20(2), 6382. <https://doi.org/10.28932/jts.v20i2.6382>
- Danielson, MG (2023). Perisai pajak, biaya modal rata-rata tertimbang, dan tingkat diskonto yang tepat untuk proyek dengan masa manfaat terbatas. *Jurnal Manajemen Risiko dan Keuangan*, 16(9), 398. <https://doi.org/10.3390/jrfm16090398>
- Duan, LW, Qu, JL, Wan, J., Xu, YH, Shan, Y., Wu, LX,... & Lin, ZF (2021). Pengaruh infeksi virus dan keanekaragaman mikroba pada pasien sepsis: Sebuah studi retrospektif

- berdasarkan sekuensing metagenomik generasi berikutnya. *Jurnal Penyakit Infeksi Menular Wuhan*, 1(1), 5-15.
- Dusia, EL, Wiyono, ES, Alifen, RS, & Rahardjo, J. (2014). Kepentingan standar bangunan hijau Indonesia dan pengaruh penerapannya terhadap biaya proyek selama umur bangunan. *Dimensi: Jurnal Arsitektur dan Lingkungan Buatan*, 1(1), 1-7.
- Eddy Husin, A., & Rohman, MN (2025). Model analisis nilai uang-berisiko untuk manfaat pabrik pencampuran beton ramah lingkungan berdasarkan metode asosiasi campuran siap pakai nasional (NRMCA). *Jurnal Arsitektur dan Penelitian Terkait Aston*, 14(2), 17051.
- El-Kasrawy, NH, Farouk, HA, & Youssef, YM (2024). Optimasi pemeliharaan berdasarkan FMECA yang dimodifikasi: Studi kasus yang diterapkan pada pabrik pemintalan. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 15, 2617. <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02617-z>
- Erliza, IY, Rahmatillah, P., Yasyifa, I., Purwati, AT, & Hanifah, L. (2025). Analisis kinerja keuangan PT Pertamina (Persero) berdasarkan rasio keuangan periode 2020-2024. *Jurnal Analisis Manajemen dan Akuntansi*, 2(2), 231.
- Fajriansyah, M., & Dwicahyani, AR (2025). Analisis kelayakan pengembangan usaha finansial dengan pendekatan ekonomi teknik, analisis sensitivitas, dan simulasi Monte Carlo. *JISO*:

*Jurnal Optimasi Sistem Informasi*, 8(2), 81–87. <https://doi.org/10.51804/jiso.v8i2.81-87>

Fajriansyah, M., & Dwicahyani, AR (2025). Analisis kelayakan pengembangan usaha finansial dengan pendekatan ekonomi teknik, analisis sensitivitas, dan simulasi Monte Carlo. *Jurnal Manajemen Berkelanjutan*, 8(2), 81-87.

Farungsang, L., Varquez, AC, & Tokimatsu, K. (2025). Penilaian geospasial dan analisis ekonomi potensi fotovoltaiik surya atap di Thailand. *Keberlanjutan*, 17(15), 7052. <https://doi.org/10.3390/su17157052>

Febian, G., & Wibisono, MA (2025). Analisis kelayakan ekonomi perancang pabrik kelapa sawit mini dengan kapasitas 1000 ton per tahun menggunakan metode life cycle costing: Studi kasus desa Bukit Layang, Bangkabelitung. *Jurnal Sosial dan Teknologi*, 5(9), 32396.

Febriani, SDA (2024). Analisis tekno ekonomi pemasangan PLTS rooftop on grid 120 kW (Studi kasus PLTS di PT Santinilestari Energi Indonesia). *Jurnal Teknik Elektro dan Teknologi Aplikasi*, 2(2), 31. <https://doi.org/10.25047/jteta.v2i2.31>

Febriani, SDA (2024). Analisis tekno ekonomi pemasangan PLTS rooftop on grid 120 kW (Studi kasus PLTS di PT Santinilestari Energi Indonesia). *Jurnal Teknologi Energi dan Lingkungan*, 2(2), 31.

Febriani, SDA, & Rani, CT (2024). Kajian tekno ekonomi sistem on-grid pada rumah kaca pintar. *Jurnal Teknik Elektro dan*

33. <https://doi.org/10.25047/jteta.v3i1.33>

Ferreira, MB, Kremer, GM, Ribeiro, BS, Barros, MV, Salvador, R., de Francisco, AC, & Piekarski, CM (2021). Diskusi besar mengenai biaya siklus hidup sistem pembangkit listrik. *Seri Konferensi IOP: Ilmu dan Teknik Material*, 1196(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1196/1/012007>

Fikru, MG, Gelles, GM, Ichim, AM, & Smith, JD (2019). Catatan tentang ekonomi sistem energi hibrida perumahan. *Energies*, 12(14), 2639. <https://doi.org/10.3390/EN12142639>

Franata, H., Honesti, L., & Nandikk, M. (2025). Analisis pengendalian biaya konstruksi dengan metode life cycle cost (LCC) pada jembatan. *Jurnal Teknik dan Desain Jembatan*, 3(3), 96-111.

Galevskiy, S., & Qian, H. (2025). Metode diskon biner untuk evaluasi ekonomi proyek hidrogen: Studi penerapan berdasarkan biaya hidrogen yang dirata-ratakan (LCOH). *Energies*, 18(14), 3839. <https://doi.org/10.3390/en18143839>

Gandotra, Y., Sharma, B., & Singh, A. (2025). Analisis biaya volume laba. *Jurnal Internasional Penelitian Pendidikan dan Studi Ilmiah*, 21(2), 28–36. <https://doi.org/10.62643/ijerst.v21.n2.pp2829-2836>

Halidah, H., Vannia, D., Dianti, ER, Priandana, GT, Chandrasa, C., Amelia, D., Rianjani, NA, & Aryono. (2024). Analisis titik

impas kendaraan listrik baterai dan kendaraan bermesin pembakaran internal di pasar Indonesia. *Prosiding Simposium Internasional tentang Transportasi dan Aplikasinya*, 7236884, 1–

12. <https://doi.org/10.5109/7236884>

Han, J., Du, E., Lv, X., & Hou, J. (2024). Konfigurasi optimal rendah karbon dari sistem energi listrik dan gas alam terintegrasi dengan emisi karbon siklus hidup. *Proses*, 12(4), 845. <https://doi.org/10.3390/pr12040845>

Hastama, K., Hiendro, A., & Khwee, KH (2024). Studi teknis dan ekonomis sistem PLTS rooftop di Gaia Bumi Raya City Mall Pontianak menggunakan Homer. *Konservasi Energi Berkelanjutan*, 4(7), 2607.

Hidayat, R. (2024). Analisis cost volume profit (CVP) sebagai metode manajemen laba pada UMKM Madu Asy-Syifa. *Tinjauan Manajemen dan Akuntansi*, 3(2), 1–15. <https://doi.org/10.55123/mamen.v3i2.3549>

Hidayat, SN, & Widiastuti, I. (2025). Studi perancangan sistem PLTS on-grid pada kawasan PLTD Setajam. *Electra: Jurnal Tenaga Listrik dan Otomasi*, 5(2), 22037.

Hidro, R. (2025). Penerapan Building Information Modeling (BIM) dalam perencanaan dan penjadwalan pekerjaan struktur beton Gedung Griya Bumi Silampari di Kabupaten Musi Rawas. *Jurnal Penelitian Manajemen dan Teknologi Informasi*, 1(2), 2.

- Hoesli, M., & Shmygel, A. (2025). Penentu tingkat diskonto, tingkat kapitalisasi, dan tingkat pertumbuhan. *Jurnal Investasi Properti & Keuangan*, 43(2), 152. <https://doi.org/10.1108/jpif-12-2024-0152>
- Huang, J., Guo, J., Yao, D., Cao, Z., He, C., Gu, C., & Zhou, Q. (2024). Kerangka kerja penilaian manfaat komprehensif untuk integrasi kendaraan listrik yang teratur dalam jaringan distribusi tiga fasa. Makalah dipresentasikan pada Konferensi Internasional IEEE tentang Teknik Elektro dan Inovasi tahun 2024.
- Hughes, L., & Sharif, MH (2025). Analisis keseimbangan tarif listrik yang berubah-ubah dan tarif tetap. *Energies*, 18(24), 6424. <https://doi.org/10.3390/en18246424>
- Husin, AE, & Rahmatanah, I. (2023). Analisis faktor-faktor yang berpengaruh dalam penerapan konsep ramah lingkungan untuk peningkatan kinerja biaya menggunakan struktural Equation Modelling-Partial Least Square (SEM-PLS). *Teknik: Jurnal Teknik Sipil*, 44(1), 49522.
- Idhan, M. (2025). Analisis penggunaan energi terbarukan untuk operasional alat berat tambang di lokasi terpencil di Indonesia. *Penelitian dalam Studi Global dan Internasional*, 4(4), 3323.
- Ilham, M., & Mainil, R. (2025). Mengoptimalkan pemeliharaan preventif untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya pemeliharaan - Artikel ulasan. *JOMASE*, 69(3), 483. <https://doi.org/10.36842/jomase.v69i3.483>

- Imami, AM, & Indianto, MA (2025). Analisis penggunaan data infrastruktur pengukuran canggih (AMI) untuk skema tarif listrik dinamis di PT PLN (Persero) UID Jawa Tengah dan DI Yogyakarta. *Jurnal Ilmu Teoretis dan Terapan*, 3(7), 172. <https://doi.org/10.58631/jtus.v3i7.172>
- Israr, M., Haider, SA, Ahmed, M., Idrees, A., Shujaat, H., Khan, A., & Ghulam, A. (2025). Desain dan evaluasi kinerja sistem hibrida surya-angin untuk elektrifikasi di luar jaringan: Menganalisis keandalan energi, optimasi penyimpanan, dan pertimbangan biaya-manfaat di daerah terpencil dan pedesaan. *Jurnal Penelitian Global Ilmu Pengetahuan Alam dan Fisika*, 3(2), 8.
- Istiqomah, I. (2023). Asal usul dan biaya proyek pembangunan jaringan gas menggunakan metode life cycle costing. *Jurnal Bangunan Metropolis*, 1(2), 53.
- Jiao, S. (2025). Pemanfaatan Internet of Things dan Big Data untuk Manajemen Aset dan Akuntansi Perusahaan. *Jurnal Manajemen Teknik dan Teknologi*, 7(1), 2505. <https://doi.org/10.1142/s0129156425402505>
- Kadji, RA, Boymau, IA, & Bouk, PKS (2025). Analisis studi kelayakan penambangan sirtu ekonomi di PT Danang Mandiri Desa Tuapanaf Kecamatan Takari Kabupaten Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur. *Agromitech: Agronomi dan Teknik Pertanian*, 2(4), 754. <https://doi.org/10.47134/aaem.v2i4.754>

- Kalke, D., Kokkonda, K., & Kulkarni, P. (2018). Analisis keuangan sistem fotovoltaik surya atap terhubung jaringan yang menggunakan net-metering. Makalah dipresentasikan pada Konferensi Internasional IEEE tentang Energi Surya dan Penyimpanan Energi 2018.
- Kandel, P., Chapagain, K., & Mishra, S. (2026). Analisis diagnostik desain tarif listrik di Nepal. *IET Energy Systems Integration*, 1-15. <https://doi.org/10.1049/enc2.70030>
- Kandiyoh, GE, Sengkey, SL, Tampi, R., & Mantiri, N. (2025). Mengoptimalkan strategi pemeliharaan bangunan menggunakan evaluasi visual dan analisis biaya siklus hidup. *MUDIMA*, 5(11), 687. <https://doi.org/10.55927/mudima.v5i11.687>
- Karnanto, B., Winasis, W., & Ramadhani, Y. (2023). Perancangan dan analisis tekno ekonomi generator diesel PLTH-fotovoltaik menggunakan Homer di Pulau Sambu, Kepulauan Riau. *Jurnal Teknologi dan Inovasi Tenaga*, 289.
- Kartikasari, V., Asmoro, AY, Passa Putra, AF, Putri, DO, & Khotimah, I. (2024). Analisis kelayakan harga tenaga listrik PLTS dengan metode life cycle cost dan LCOE. *Jurnal Ilmu Ventilasi*, 6(1), 13093. <https://doi.org/10.26905/jiv.v6i1.13093>
- Kartikasari, V., Asmoro, AY, Putra, AFP, Putri, DO, & Khotimah, I. (2024). Analisis kelayakan harga tenaga listrik PLTS dengan metode life cycle cost dan LCOE. *Jurnal Inovasi dan Usaha*, 6(1), 13093.

- Kartikasari, V., Asmoro, AY, Putra, AFP, Putri, DO, & Khotimah, I. (2024). Analisis kelayakan harga tenaga listrik PLTS dengan metode life cycle cost dan LCOE. *Jurnal Inovasi dan Usaha*, 6(1), 13093.
- Kasinathan, P., Govindarajan, U., Ramachandaramurthy, VK, & Selvi, SOT (2017). Analisis ekonomi sistem PV surya berbasis pengambilan keputusan multikriteria (MCDM) sehubungan dengan investigasi kinerja untuk pasar India. *Sustainability*, 9(5), 820. <https://doi.org/10.3390/su9050820>
- Katlya, B., & Widyatami, FS (2025). Analisis kelayakan finansial proyek pembangunan perumahan sewa vertikal di Kota Surakarta. *Jurnal Transportasi dan Pengajaran Teknis*, 3(2), 979. <https://doi.org/10.47970/jttt.v3i2.979>
- Khan, AA, Minai, A., Godi, R., Sharma, VS, Malik, H., & Afthanorhan, A. (2025). Penentuan ukuran optimal, kelayakan teknis-ekonomi, dan analisis keandalan sistem energi terbarukan hibrida: Tinjauan sistematis integrasi sistem penyimpanan energi. *IEEE Access*, 3535520, 1-35. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3535520>
- Kiagus Andi, L., & Oktavia, R. (2022). Pengaruh penerapan akuntansi biaya aliran material terhadap akuntansi hijau dan kinerja keuangan. *Nilai Wajar: Jurnal Ilmu Akuntansi, Keuangan dan Audit*, 5(2), 2327.
- Kines, KE, Soedjarwanto, N., & Huda, Z. (2024). Perancangan pembangkit listrik tenaga surya sistem on grid pada kantor

- PT PLN Unit Induk Distribusi Lampung berbasis simulasi. *Jurnal Elektro Luceat*, 18(3), 2704. <https://doi.org/10.23960/elc.v18n3.2704>
- Kurniawan, I., & Husin, AE (2023). Analisis faktor-faktor yang berpengaruh dalam penerapan konsep ramah lingkungan untuk peningkatan kinerja biaya menggunakan struktural Equation Modelling-Partial Least Square (SEM-PLS). *Teknik: Jurnal Teknik Sipil*, 44(1), 49522.
- Kusuma, A., & Dalimi, R. (2025). Analisa teknologi dan ekonomi dedieselisasi PLTD Merawang menjadi Pembangkit berbasis energi terbarukan di Pulau Bangka, Bangka Belitung. *Konservasi Energi Berkelanjutan*, 5(1), 3119.
- Laksono, DT, Pratama, LACP, Ubaidillah, A., Fahmi, MF, & Laksono, DT (2025). Simulasi dan perancangan PLTS offgrid 3 kW menggunakan software PVsyst. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Negeri Banjarmasin*, 9(2), 1264. <https://doi.org/10.36277/jteuniba.v9i2.1264>
- Lamba, S. (2025). Kelayakan ekonomi proyek tenaga surya di pedesaan India: Analisis biaya-manfaat. *Sustainable Management Review*, 250167. <https://doi.org/10.70388/sm250167>
- Lawoyin, JO, Sikhakhane, ZS, & Gbabo, EY (2023). Model alokasi sumber daya untuk efisiensi dalam sistem manajemen fasilitas kompleks. *Jurnal Internasional Penelitian dan Manajemen Ilmiah*, 3(2), 4893. <https://doi.org/10.62225/2583049x.2023.3.2.4893>

- Le, MH, Pham, TD, & Nguyen, TT (2025). Analisis ekonomi optimal stasiun pengisian kendaraan listrik, teknologi energi terbarukan, dan bank kapasitor dalam jaringan distribusi. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 70010. <https://doi.org/10.1049/gtd2.70010>
- Li, S., Sun, C., & Li, Z. (2023). Desain tarif TOU yang ditingkatkan untuk memfasilitasi pemotongan beban puncak dan pengisian beban lembah dalam sistem tenaga listrik. *Prosiding Konferensi IEEE 2023 tentang Internet Energi dan Integrasi Sistem Energi*, 5712918. <https://doi.org/10.1109/EI259745.2023.10512918>
- Li, X., Qian, J., Yang, C., Chen, B., Wang, X., & Jiang, Z. (2024). Perencanaan sistem tenaga baru dan jalur evolusi dengan koordinasi sumber daya multi-fleksibilitas. *Energies*, 17(1), 273. <https://doi.org/10.3390/en17010273>
- Li, Y., Liu, X., Han, Y., & Xue, X. (2026). Pengurangan emisi dan kelayakan ekonomi industri tenaga surya termal Tiongkok setelah pengenalan kebijakan pengurangan emisi bersertifikat Tiongkok. *Energy Science & Engineering*, 70464. <https://doi.org/10.1002/ese3.70464>
- Liang, H. (2025). Penerapan tiga metode analisis keuangan dalam investasi: Studi kasus komparatif. *Jurnal Studi Pendidikan dan Manajemen*, 19017. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2024.ld19017>

- Lin, W., & Ye, R. (2021). Analisis ekonomi tentang pengoperasian sistem fotovoltaik di Fujian. Makalah dipresentasikan pada Konferensi IEEE tentang Energi Bersih dan Terbarukan tahun 2021.
- Lisdawati, J., Silalahi, E., & Purba, R. (2022). Perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sistem on-grid berbasis Homer untuk memenuhi energi listrik di Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 1 Teriak, Bengkayang Kalimantan Barat. *Lektrokom: Jurnal Elektro dan Komputer*, 5(1), 5162.
- Lumbanbatu, F., & Sriyanto, D. (2025). Teknologi hijau dan strategi keuangan berkelanjutan: Studi penerapan green engineering dan green Accounting pada industri manufaktur. *Forum Asia untuk Keberlanjutan dan Keadilan*, 5(2), 1122.
- Maharany, I., & Hidayah, N. (2025). Analisis perhitungan cost-volume-profit sebagai alat bantu perencanaan laba perusahaan. *EQIEN (Tinjauan Ekonomi dan Pendidikan)*, 14(1), 1–16. <https://doi.org/10.34308/eqien.v14i01.1944>
- Mahdalena, V., Saleh, MI, & Purnamasari, S. (2024). Pengaruh paparan benzena pada jumlah eritrosit, leukosit, trombosit dan kadar hemoglobin: Literatur review. *Review Jurnal Penelitian*, 6(5), 991.
- Mekonnen, T., Tsegaye, S., Belete, B., Selvaraj, J., Negewo, A., Minaye, E.,... & Wolie, A. (2025). Tarif feed-in fotovoltaik surya: Analisis kelayakan dan rekomendasi

kebijakan. *Laporan Ilmiah*, 32105, 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32105-8>

- Mungra, M., Vishwakarma, S., & Tyagi, R. (2025). Keberlanjutan ekonomi integrasi energi terbarukan: Analisis biaya-manfaat komparatif menggunakan EIRR, NPV, dan LCOE di seluruh pulau kecil dan sistem perkotaan. *Review of Business Research*, 1(1), 3-22. <https://doi.org/10.22495/rbrv1i1p3>
- Mungra, M., Vishwakarma, S., & Tyagi, R. (2025). Keberlanjutan ekonomi integrasi energi terbarukan: Analisis biaya-manfaat komparatif menggunakan EIRR, NPV, dan LCOE di seluruh pulau kecil dan sistem perkotaan. *Review of Business Research*, 1(1), 3.
- Murty, VVSN, & Kumar, A. (2020). Manajemen energi optimal dan analisis tekno-ekonomi dalam mikrogrid dengan sumber energi terbarukan hibrida. *Masalah Matematika dalam Rekayasa Komputasi*, 2020, 000273.
- Mutiah, F., & Sudiarto, B. (2025). Pengaruh penggunaan PV-BESS terhadap emisi karbon dan biaya energi. *Jurnal Teknik dan Sistem Energi*, 7(2), 7695.
- Nair, VV, & Nair, U. (2023). Pemilihan desain tarif listrik untuk jaringan distribusi menggunakan proses jaringan analitik. *Jurnal Internasional Proses Hierarki Analitik*, 15(2), 1052. <https://doi.org/10.13033/ijahp.v15i2.1052>
- Nasir, A., Salau, AO, Dribssa, E., & Girma, M. (2023). Analisis teknis dan ekonomi pompa sebagai turbin untuk elektrifikasi

- pedesaan. *Jurnal Teknik Tenaga dan Energi*, 11(8), 244606. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2244606>
- Navajas, F. (2023). Desain struktur tarif listrik di Amerika Latin: Di mana posisi kita sekarang? Ke mana seharusnya kita melangkah? *Energi untuk Pembangunan Berkelanjutan*, 73, 101-116. <https://doi.org/10.18235/0005102>
- Nguyen, HH, Bui, VG, Le, KB, Nguyen, VT, & Hoang, AT (2025). Analisis ekonomi-lingkungan sistem energi terbarukan hibrida surya-angin-biomassa untuk produksi hidrogen: Studi kasus di Vietnam. *Jurnal Internasional Pengembangan Energi Terbarukan*, 61233, 1-20. <https://doi.org/10.61435/ijred.2025.61233>
- Njigela, M., & Mkilania, J. (2025). Pengembangan model analisis biaya siklus hidup untuk bangunan kamar mayat guna meningkatkan kinerja ketersediaan: Studi kasus Rumah Sakit Dewan Kota Musoma. *Jurnal Internasional Penelitian Akademik*, 8(1), 3494. <https://doi.org/10.37284/ijar.8.1.3494>
- Noerman, I., & Faturrohman, T. (2024). Analisis kelayakan investasi menggunakan metode valuasi arus kas terdiskonto (Studi kasus: Tambang emas di Pit A PT XYZ). *Asian Journal of Engineering and Social Sciences*, 3(10), 445. <https://doi.org/10.46799/ajesh.v3i10.445>
- Nuryanti, N., Suparman, S., Nasrullah, M., Amitayani, ES, & Widodo, WL (2015). Analisis kelayakan finansial proyek

- PLTN SMR di Indonesia dengan mempertimbangkan variabel pemerintah. *Jurnal Energi Nuklir*, 17(2), 2609.
- Obiabuchi, U., & Olabisi, OT (2026). Analisis sensitivitas sistem energi terbarukan hibrida di fasilitas minyak menggunakan HOMER. *American Journal of Engineering and Environmental Engineering*, 14(1), 13-28. <https://doi.org/10.11648/j.ajee.20261401.13>
- Okonkwo, PC, Barhoumi, EM, Al Housni, F., Agyekum, EB, Emori, W., Ayodele, B.,... & Radwan, A. (2024). Analisis kelayakan tekno-ekonomi sumber energi terbarukan hibrida untuk klinik kesehatan: Studi kasus. *MRS Communications*, 14(2), 78-86. <https://doi.org/10.1557/s43581-023-00078-8>
- Okonkwo, PC, Barhoumi, EM, Al Housni, F., Agyekum, EB, Emori, W., Ayodele, B.,... & Radwan, A. (2024). Analisis kelayakan tekno-ekonomi sumber energi terbarukan hibrida untuk klinik kesehatan: Studi kasus. *MRS Communications*, 14(2), 078-8. <https://doi.org/10.1557/s43581-023-00078-8>
- Oktavia, LS, Aldina, L., Nurdyanto, N., Fahrati, M., & Yulaeli, T. (2023). Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai waktu uang: Nilai masa depan, nilai sekarang, dan anuitas. *Jurnal Pilar Manajemen*, 2(3), 217-230. <https://doi.org/10.55606/jupiman.v2i3.2224>
- Oskouei, SFS, Abapour, M., & Beiraghi, M. (2024). Mengidentifikasi komponen kritis untuk keandalan sarana perkeretaapian: Studi kasus untuk Iran. *Scientific Reports*, 14, 62841. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62841-2>

- Pamuk, N., & Omar, FA (2025). Penilaian tekno-ekonomi dan lingkungan dari sistem energi terbarukan on-grid dan off-grid untuk Çanakkale, Turki menggunakan HOMER Pro. *Electrica*, 25, 0118. <https://doi.org/10.5152/electrica.2025.25118>
- Pejovi, B., Mati, AB, & Ljumovi, I. (2022). Kekhususan analisis sensitivitas dalam evaluasi proyek investasi internasional. *Prosiding EMAN 2022*, 207–225. <https://doi.org/10.31410/eman.2022.207>
- Pertiwi, S., Bobby, Y., Lorenzo, M., Dafiqurrohman, H., & Surjosatyo, A. (2022). Kinerja dan analisis tekno-ekonomi gasifikasi sekam padi bergerak sebagai pembangkit listrik skala mikro: Pemodelan dan eksperimen. *Jurnal Ilmu Rekayasa dan Teknologi*, 54(6), 8. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.6.8>
- Pranoto, A., Hermawan, H., & Albart, N. (2025). Tinjauan literatur sistematis: Analisis kelayakan bisnis menggunakan metode nilai sekarang bersih (NPV) dan tingkat pengembalian internal (IRR) di industri otomotif. *Jurnal Sistem Informasi dan Pengadaan Strategis*, 6(1), 1577. <https://doi.org/10.59141/jiss.v6i1.1577>
- Prayitno, H., Prabowo, A., Salsabillah, AE, & Khairudin, R. (2021). Investigasi awal karakteristik perpindahan panas pengering putar dengan sistem ruang vakum bersirip. *Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Terbuka*, 1(1), 14.

- Puhsessi, IN (2021). Life cycle cost pada Gedung Asrama daerah Glagahsari, Yogyakarta. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 9(1), 2297.
- Putra, MA, & Prabowo, E. (2025). Analisis kelayakan proyek pembangunan pusat listrik tenaga surya (PLTS) apung Tembesi 40 MWp di sistem kelistrikan Batam-Bintan. *Jurnal Amplifier*, 15(1), 35885. <https://doi.org/10.33369/jamplifier.v15i1.35885>
- Putra, MA, & Prabowo, E. (2025). Analisis kelayakan proyek pembangunan pusat listrik tenaga surya (PLTS) apung Tembesi 40 MWp di sistem kelistrikan Batam-Bintan. *JAMplifier: Jurnal Teknik Amplifier*, 15(1), 35885.
- Rahmi, F., Sayekti, CD, Dahar, R., & Yanti, NSP (2023). Analisis cost volume profit (CVP) sebagai alat perencanaan laba pada UMKM Pempek Palembang MWR. *Jurnal Ekonomi dan Pengembangan Bisnis*, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.47233/jebd.v25i1.736>
- Setiawan, A., & Hermanto, A. (2022). Pengembangan perangkat lunak optimasi ekonomi dan analisa finansial PLTS studi kasus PLTS 10 MWAC. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 17(2), 342. <https://doi.org/10.36289/jtmi.v17i2.342>
- Setiawan, B., Wardhana, EGW, Alamie, NF, & Parianom, R. (2025). Model perhitungan biaya siklus hidup alat utama sistem senjata Tentara Nasional Indonesia. *SDGs Review*, 5(3), e03872. <https://doi.org/10.47172/2965-730x.sdgsreview.v5.n03.pe03872>

- Silla, AWG, Ndoen, W., Faah, YS, & Amtiran, PY (2025). Evaluasi kelayakan investasi mesin pencetak batako (studi kasus pada PT. Teon Jaya Kota Kupang). *Glory: Jurnal Tinjauan Ekonomi dan Bisnis*, 6(6), 22580. <https://doi.org/10.70581/glory.v6i6.22580>
- Singh, M., Cain, B., & Azevedo, IML (2025). Desain tarif ritel untuk sistem listrik yang terdekarbonisasi dan tangguh. *Jurnal Fisika: Energi*, 3(4), 045024. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ae077b>
- Sitorus, YG, Widodo, B., & Purba, R. (2022). Perancangan pembangkit listrik tenaga surya sistem on-grid di atap gedung untuk memenuhi kebutuhan energi listrik Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia Jakarta. *Lektrokom: Jurnal Elektro dan Komputer*, 5(1), 5249.
- Sugindhari, NPG, Respati, R., & Saputra, NA (2024). Implementasi value engineering untuk optimasi pembiayaan pada proyek konstruksi. *Jurnal Manajemen Teknik Sipil*, 7(2), 27058.
- Sumardana, AM, Artani, KTB, & Putri, IGAPD (2026). Analisis investasi teknologi informasi aplikasi Pospay pada PT POS Indonesia (Persero). *Jurnal Akuntansi dan Inovasi Teknologi*, 10(1), 17114. <https://doi.org/10.36040/jati.v10i1.17114>
- Supriadi, S., & Sudiarto, B. (2025). Analisis harga pembelian energi listrik yang optimal untuk pembangkit listrik energi terbarukan di kawasan timur Indonesia. *Jurnal Ekonomi*

8. <https://doi.org/10.24843/eeb.2025.v14.i08.p08>

Supriadi, S., & Sudiarto, B. (2025). Analisis harga pembelian energi listrik yang optimal untuk pembangkit energi terbarukan di kawasan timur Indonesia. *Ecologica: Ilmu Lingkungan dan Biologi*, 14(8), 08.

Supriadi, S., & Sudiarto, B. (2025). Analisis harga pembelian energi listrik yang optimal untuk pembangkit listrik energi terbarukan di kawasan timur Indonesia. *Jurnal Teknologi Energi dan Biomassa*, 26933.

Supriatna, A., Tandayu, FF, Aripin, DZ, Alfisyahrin, R., & Putra, KA (2025). Penerapan value engineering pada proyek pembangunan Gedung Record Center Bank Tabungan Negara (BTN) Bandung Jawa Barat. *Cerdika: Jurnal Teknik Sipil*, 5(9), 2769.

Tadesse, YY, Erenolu, AK, Sancar, S., & Erdin, O. (2024). Mengoptimalkan sistem energi perumahan di rumah tangga: Sebuah model yang mengintegrasikan aset energi dengan evaluasi ekonomi melalui LCOCE. *Konferensi Internasional Elektronik Daya dan Energi Listrik 2024*, 61896, 10582634. <https://doi.org/10.1109/GPECOM61896.2024.10582634>

Testa, R., Galati, A., Schifani, G., & Migliore, G. (2025). Efektivitas biaya penyemprot pertanian konvensional dan presisi di kebun anggur Italia Selatan: Analisis titik impas. *Pertanian*

*Presisi*, 26, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11119-025-10233-5>

- Utami, RD, Putra, AM, & Rosyid, LMA (2025). Analisis dampak lingkungan akibat kegiatan panas bumi: Studi literatur hubungan siklus hidup biaya dengan kerusakan lingkungan. *Jurnal Remediasi Lingkungan dan Manajemen Bahaya*, 3(2), 2841.
- Winarta, IGWP, Suthanaya, PA, & Priyantha, DM (2025). Analisis kelayakan ekonomi pembangunan jalan baru titik 7 dan 8 ruas Singaraja-Mengwitani. *Jurnal Konstruksi*, 23(2), 2559. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.23-2.2559>
- Winarta, IGWP, Suthanaya, PA, & Priyantha, DM (2025). Analisis kelayakan ekonomi pembangunan jalan baru titik 7 dan 8 ruas Singaraja-Mengwitani. *Jurnal Konstruksi*, 23(2), 2559. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.23-2.2559>
- Wiranata, F., Kristiyani, I., & Laheba, T. (2025). Optimasi penggunaan sistem hybrid panel surya-PLN untuk meminimalkan biaya energi listrik jangka panjang (kasus studi: 20 tahun). *Jurnal Aplikasi Teknik Industri*, 20(3), 155-162.
- Wyszomierski, R., Brawski, P., Bedycka-Brawska, A., Brelik, A., Wysokiski, M., & Wiluk, M. (2025). Efektivitas biaya sumber energi terbarukan dalam kerangka ekonomi ekologi Uni Eropa. *Keberlanjutan*, 17(10), 4715. <https://doi.org/10.3390/su17104715>

- Yunesti, P., & Wardani, WK (2025). Analisis kelayakan tekno-ekonomi PLTS on-grid pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung. *Jurnal Ilmu Teknik Elektro*, 13(3), 7977. <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3s1.7977>
- Yunesti, P., & Wardani, WK (2025). Analisis kelayakan tekno-ekonomi PLTS on-grid pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung. *Jurnal Rekayasa Industri dan Teknologi*, 13(3), 7977.
- Yunesti, P., & Wardani, WK (2025). Analisis kelayakan tekno-ekonomi PLTS on-grid pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung. *Jurnal Ilmu Teknik Elektro*, 13(3), 7977. <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3s1.7977>
- Zakia, Z., Safriani, M., Radianica, N., & Ikhwal, MF (2021). Studi kelayakan ekonomi pengembangan saluran irigasi. *Jurnal Internasional Pendidikan, Studi Sosial, dan Teknologi*, 2(1), 217. <https://doi.org/10.52088/ijestv.v2i1.217>
- Zalukhu, R., Hutauruk, RPS, Collyn, D., & Hutabarat, MI (2025). Analisis perilaku biaya dan penerapan cost-volume-profit (CVP) pada UMKM Lemang Batok di Kota Tebing Tinggi. *Akuntansi Publik*, 4(2), 1–20. <https://doi.org/10.70021/ap.v4i2.288>
- Zein, R., Maulida, I., Buwono, ID, & Nurhayati, A. (2026). Analisis kelayakan finansial budidaya udang semi intensif di desa Ciheras Tasikmalaya. *Jurnal Perikanan*, 15(6), 1982. <https://doi.org/10.29303/jp.v15i6.1982>

Buku referensi yang berjudul *Ekonomi Teknik dan Energi Listrik* mengulas dengan detail hubungan antara aspek ekonomi dan teknik dalam pengelolaan sistem energi listrik. Ditenagai oleh prinsip-prinsip ekonomi teknik, buku ini menawarkan pemahaman tentang bagaimana perencanaan, pengelolaan, dan efisiensi dalam sektor energi listrik dapat berkontribusi pada penghematan biaya dan keberlanjutan sumber daya.

Pembaca akan dibimbing untuk memahami evaluasi proyek energi listrik, analisis biaya-manfaat, serta teknik pengelolaan dan pemanfaatan energi secara optimal. Ditujukan untuk masyarakat umum, buku ini cocok bagi mereka yang tertarik pada topik energi, efisiensi biaya, dan pengembangan sistem tenaga listrik yang berkelanjutan.