

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 SISTEM KELISTRIKAN

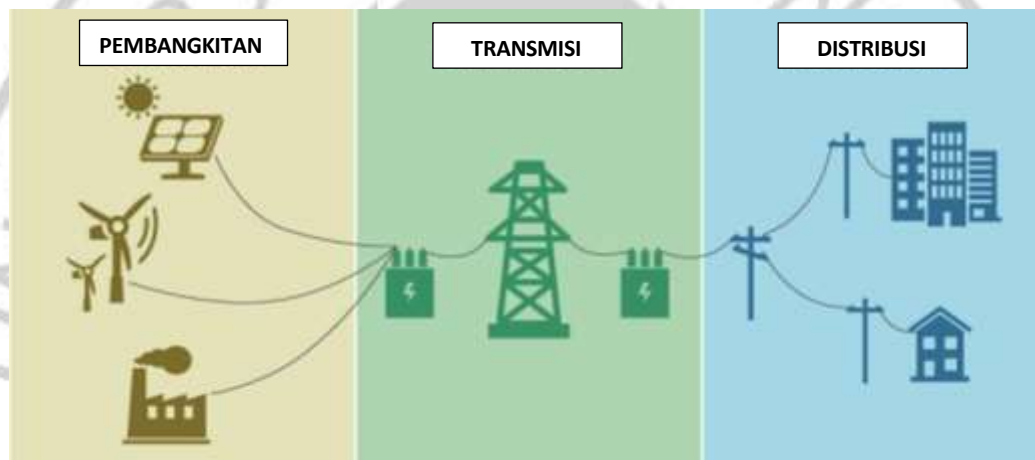
2.1.1 Konsep Penyaluran Energi

Sistem kelistrikan adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa bagian yang saling terhubung dan terintegrasi untuk menyuplai kebutuhan listrik ke beban. Secara umum sistem kelistrikan terdiri dari dua lingkup besar, yaitu sistem pembangkitan dan sistem penyaluran. Sistem pembangkitan berfungsi untuk memproduksi energi listrik dengan memanfaatkan berbagai sumber energi, seperti bahan bakar fosil, air, angin, panas bumi, dan sinar matahari. Sementara itu, sistem penyaluran membawa energi listrik yang telah dihasilkan menuju konsumen akhir. Sistem penyaluran ini sendiri terbagi menjadi dua bagian penting yaitu sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem transmisi AC tiga fase di Indonesia digunakan untuk sebagian besar saluran transmisi dengan 4 level tegangan yaitu 66 kV, 150 kV, 275 kV dan 500 kV sedangkan sistem distribusi dengan tegangan 20kV dan tegangan 220V-240V.

Jaringan transmisi berfungsi untuk mentransfer listrik dari pembangkit menuju pusat beban yang umumnya berjarak jauh. Tegangan yang digunakan di tahap ini cukup tinggi agar energi listrik dapat disalurkan dengan efisiensi tinggi dan kehilangan daya (losses) yang minimal. Selanjutnya, listrik dari jaringan transmisi akan diturunkan tegangannya melalui gardu induk sebelum masuk ke sistem distribusi, yang bertugas menyuplai listrik langsung ke konsumen. Sistem transmisi tenaga listrik di Indonesia yang dikelola oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) menggunakan teknologi arus bolak-balik (AC) tiga fase karena efisiensinya yang tinggi dalam mentransfer daya dalam skala besar. Pemilihan sistem tiga fase ini memungkinkan penggunaan kabel yang lebih ekonomis dan performa motor listrik yang lebih stabil. Dalam sistem tiga fase, dikenal dua jenis tegangan utama yaitu :

1. Tegangan antar-konduktor (line-to-line voltage), yaitu tegangan yang diukur antara dua konduktor fase.
2. Tegangan fase ke tanah (line-to-ground voltage), yaitu tegangan antara satu konduktor fase dengan tanah atau netral. Secara matematis, tegangan fase ke tanah bernilai lebih kecil, yakni setara dengan tegangan antar - konduktor dibagi $\sqrt{3}$ (akar tiga).

Gambar 1 berikut menyajikan representasi skematis dari sistem pembangkitan, transmisi dan distribusi energi listrik secara umum.



Gambar 1 Konsep Penyaluran Energi Listrik yang meliputi Pembangkitan, Transmisi dan Distribusi

Dalam skema penyaluran energi listrik sesuai gambar diatas, proses diawali di pembangkitan, di mana energi listrik dihasilkan pada tegangan keluaran berkisar antara 15 hingga 25 kV. Tegangan pada level ini masih tergolong rendah dan tidak ekonomis untuk keperluan transmisi jarak jauh karena dapat menyebabkan kerugian daya yang signifikan. Untuk meminimalkan rugi-rugi energi selama proses transmisi, tegangan dari generator perlu dinaikkan menggunakan transformator daya yang dipasang di area pembangkitan. Peningkatan tegangan ini secara bersamaan akan menurunkan arus, sehingga efisiensi transmisi dapat ditingkatkan dan dimensi konduktor dapat diperkecil. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, tegangan dinaikkan hingga 500 kV dan ditransmisikan melalui Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) menuju Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET). Gardu Induk berfungsi sebagai titik penghubung antara sistem transmisi dan distribusi, serta sebagai tempat penurunan tegangan secara bertahap sesuai kebutuhan sistem. Umumnya, gardu semacam ini ditempatkan di wilayah pinggiran kota besar atau di sekitar Pusat Beban, yaitu area

dengan konsumsi energi listrik yang tinggi [2]. Energi listrik yang keluar dari Gardu Induk menuju sistem distribusi diturunkan tegangannya menjadi tegangan 20 kV serta di jaringan distribusi nantinya akan diturunkan menjadi tegangan rendah 220-240 Volt oleh trafo daya sehingga dapat digunakan oleh konsumen rumah tangga untuk menyalakan peralatan elektronik rumah tangga.

2.1.2 Biaya Pokok Penyediaan (BPP)

Tenaga listrik sangat berpengaruh pada pertumbuhan dan perkembangan ekonomi di suatu negara. Oleh karena itu, penetapan kebijakan tenaga listrik di suatu negara akan sangat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan ekonomi. Penetapan kebijakan tenaga listrik oleh pemerintah juga merupakan salah satu langkah pemerintah dalam mengatur perekonomian negara, suatu usaha yang sangat membutuhkan investasi untuk menjamin keberlangsungannya untuk masa yang akan datang. Penyediaan tenaga listrik dapat berlangsung dengan baik apabila tersedia dana investasi yang baru dari pihak lain atau penyedia listrik telah memperoleh laba (margin) yang dapat dipergunakan untuk investasi. Apabila perusahaan penyedia listrik memperoleh keuntungan, sebagian dari profit tersebut dapat dialokasikan untuk keperluan investasi. Salah satu cara untuk mencapai keuntungan dalam penyediaan listrik adalah melalui penetapan tarif. Dalam menentukan tarif dasar listrik (TDL), komponen utama yang dijadikan acuan harga jual tenaga listrik adalah Biaya Pokok Penyediaan (BPP). BPP sendiri merupakan biaya yang dikeluarkan oleh PT PLN (Persero) untuk menjalankan operasi pembangkitan, transmisi, dan distribusi listrik ke pelanggan, yang kemudian dibagi dengan total energi listrik (kWh) yang dijual. BPP tenaga listrik merupakan kumpulan biaya yang diperhitungkan (allowable) dalam perhitungan BPP atau masuk dalam kategori allowable cost (hanya biaya yang berhubungan saja, yang tidak dapat dipisahkan dalam menghasilkan tenaga listrik yang dapat dimasukkan) untuk dihitung secara hati-hati sesuai dengan prinsip wajar, konsisten dan transparan. Komponen BPP meliputi [3] :

1. Pembelian tenaga listrik termasuk sewa pembangkit.
2. Biaya bahan bakar
3. Biaya pemeliharaan yang terdiri dari material dan jasa Borongan
4. Biaya Kepegawaian
5. Biaya Administrasi

6. Penyusutan atas Aktiva Tetap Operasional
7. Biaya pinjaman yang digunakan untuk penyediaan tenaga Listrik.

2.1.3 Peramalan Kebutuhan Beban (*Load Forecasting*)

Peramalan beban listrik adalah proses esensial dalam perencanaan sektor kelistrikan dan berperan krusial dalam operasional sistem tenaga listrik. Proyeksi beban listrik ini sangat dipengaruhi oleh pertumbuhan penduduk, ekonomi, industri, serta peningkatan pendapatan masyarakat. Oleh karena itu, ketepatan peramalan beban listrik sangat diperlukan dalam penjadwalan kapasitas pembangkit dan pengelolaan sistem tenaga. Perkiraan beban yang akurat dapat memberikan penghematan signifikan dalam biaya operasional dan pemeliharaan serta mendukung pengambilan keputusan yang tepat untuk pengembangan masa depan. Selain itu, peramalan beban listrik juga menjadi langkah awal dalam perencanaan fasilitas pembangkit, transmisi, dan distribusi di masa depan.

Namun, akurasi peramalan beban dipengaruhi oleh berbagai faktor yang bersifat tidak pasti dan sulit dikendalikan, seperti perkembangan ekonomi, aktivitas sosial, kebijakan pemerintah, dan perubahan iklim. Saat ini, belum ada standar yang jelas untuk mengklasifikasikan rentang proyeksi beban. Namun, beberapa ahli membagi peramalan beban berdasarkan durasi prediksi menjadi tiga kategori: peramalan jangka pendek, menengah, dan panjang. Sementara itu, peneliti lain mengkategorikan peramalan beban menjadi empat kelompok, yaitu peramalan jangka panjang, menengah, pendek, dan sangat pendek [4].

- Perkiraan beban jangka panjang (LTLF): untuk jangka waktu lebih dari satu tahun hingga 20 tahun ke depan. Jenis prakiraan ini penting untuk perencanaan strategis, pembangunan pembangkit baru, dan pengembangan sistem penyediaan dan penyaluran tenaga listrik (unit pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi).
- Perkiraan beban jangka menengah (MTLF): biasanya untuk jangka waktu seminggu hingga satu tahun, yang digunakan untuk penjadwalan pemeliharaan dan perencanaan pembelian bahan bakar serta perdagangan energi dan penilaian pendapatan untuk peralatan.

- Perkiraan beban jangka pendek (STLF): untuk interval yang berkisar antara satu jam hingga satu minggu, sangat penting untuk pengoperasian peralatan sehari-hari, menjadwalkan pembangkitan dan penyaluran listrik.
- Perkiraan beban jangka sangat pendek/ sangat pendek (VSTLF): berkisar dari beberapa menit hingga satu jam ke depan digunakan untuk kontrol waktu real time.

Meskipun berbagai metode dan model peramalan dikembangkan untuk menghitung secara akurat peramalan beban, menemukan model peramalan yang tepat untuk jaringan listrik tertentu bukanlah suatu hal yang mudah, dan tidak ada satupun metode yang dapat digunakan untuk semua pola kebutuhan beban [4].

2.2 ANALISIS TEKNOLOGI

2.2.1 Pemilihan Tingkat Tegangan

Saluran transmisi listrik adalah elemen kunci dalam sistem kelistrikan yang memastikan distribusi daya dari pembangkit ke konsumen, perencanaan saluran transmisi dengan biaya seekonomis mungkin merupakan faktor penting bagi keberhasilan perencanaan dan pengoperasian. Salah satu keputusan kritis dalam desain sistem transmisi adalah pemilihan tingkat tegangan yang optimal, tegangan transmisi yang tepat tidak hanya mempengaruhi efisiensi sistem tetapi juga biaya infrastruktur, keandalan, dan keamanan operasional. Untuk menyalurkan energi listrik diperlukan peningkatan tegangan, yaitu tegangan dari pembangkit yang ditingkatkan dengan trafo daya step-up, peningkatan tegangan transmisi ini menyebabkan pengurangan ukuran konduktor. Tegangan tinggi digunakan untuk mengurangi kerugian daya (power losses) yang diakibatkan oleh resistansi kabel, dengan meningkatkan tegangan, arus yang diperlukan untuk transmisi daya yang sama dapat dikurangi, sehingga mengurangi kerugian daya yang sebanding dengan kuadrat arus.

Pemilihan level tegangan tinggi dalam sistem kelistrikan adalah keputusan penting yang mempengaruhi efisiensi, keamanan, dan keandalan transmisi daya dalam jarak jauh. Penggunaan tegangan tinggi untuk penyaluran daya listrik telah berkembang, pemilihan tegangan menggunakan perhitungan rumus yang berhubungan dengan panjang saluran dan besar energi listrik yang dialirkan. Tegangan saluran transmisi harus konstan sepanjang saluran, dan rugi-rugi saluran transmisi harus

diminimalkan sehingga efisiensinya tinggi dan biaya saluran menjadi minimum. Pemilihan tingkat tegangan yang ekonomis dapat diperkirakan dengan menggunakan formula sederhana sebagai berikut [5]:

$$V = 5.5 * \sqrt{\frac{L}{1.6} + \frac{P*1000}{\cos \phi * Nc * 150}} \quad (2.2.1)$$

Dimana L adalah panjang saluran transmisi dalam kM, P daya 3 phasa yang disalurkan dalam kW, $\cos \Phi$ faktor daya, dan Nc jumlah sirkit (1 = Sirkit Tunggal, 2 = Sirkit Ganda).

Hasil perhitungan ini akan dicocokkan dengan tegangan standar PLN terdekat, Tegangan standar PLN untuk saluran transmisi tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi system 3 fasa sesuai SPLN T6.001: 2013 antara lain tegangan 66 kV, 150 kV, 275 kV dan 500 kV. Berdasarkan RUPTL 2021-2030, rencana transmisi JBC akan menggunakan sistem kelistrikan dengan tegangan 500 kV.

2.2.2 Perhitungan Arus Listrik

Kapasitas Hantar Arus (KHA) merupakan parameter krusial dalam desain sistem kelistrikan, khususnya dalam menentukan kemampuan sebuah konduktor untuk menghantarkan arus listrik secara kontinu tanpa menyebabkan kenaikan suhu yang dapat melampaui batas termal yang diizinkan. Jika suhu konduktor melebihi ambang batas yang ditentukan, risiko degradasi material, kerusakan isolasi, hingga kegagalan sistem menjadi sangat signifikan. Oleh karena itu, setelah dilakukan penentuan level tegangan kabel, tahap selanjutnya dalam rekayasa kabel laut JBC adalah melakukan analisis dan perhitungan KHA secara menyeluruh. Penelitian telah dilakukan oleh Electrical Research Association (ERA) di Inggris sehubungan dengan Kapasitas Hantar Arus (KHA) kabel. Pada tegangan 36 kV ke atas, perhitungan KHA dilakukan sesuai dengan Standar IEC 60287. Standar ini memberikan panduan rinci untuk perhitungan Kapasitas Hantar Arus (KHA) listrik terkait desain kabel, kondisi pemasangan (ditanam langsung, diruang terbuka atau dalam saluran), suhu lingkungan, jarak fase dan susunan kabel, jenis dari selubung kabel dan kriteria kabel lainnya [6].

Selain itu, standar IEC 60287 juga memasukkan koreksi terhadap kondisi instalasi seperti jenis tanah atau medium penghantar panas, kedalaman pemasangan,

jarak antar kabel, jenis isolasi, dan bentuk fisik konduktor. Hal ini penting karena semua



faktor tersebut memengaruhi disipasi panas dari kabel ke lingkungan sekitarnya. Dengan demikian, pemodelan termal dan perhitungan KHA bukan hanya sekadar menentukan nilai arus maksimum yang dapat dialirkan, tetapi juga menjadi dasar untuk menjamin keandalan operasi, efisiensi energi, dan keselamatan sistem dalam jangka panjang. Proses ini sangat penting dalam perencanaan dan pengoperasian sistem transmisi maupun distribusi tenaga listrik, khususnya dalam proyek-proyek kelistrikan berskala besar seperti kabel laut JBC, sehingga didapatkan arus yang akan mengalir melalui transmisi JBC diperkirakan sebesar [6] :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos \phi} \quad (2.2.2)$$

Dimana I adalah Kapasitas Hantar Arus (Ampere), P adalah daya 3 fasa yang disalurkan (VA), U adalah nilai tegangan (Volt) dan $\cos \phi$ adalah faktor daya (0,9).

Besar arus tersebut yang akan disalurkan menggunakan dua sirkit kabel AC 3 fasa (masing-masing kabel merupakan kabel berinti tunggal). Batasan besar arus yang akan disalurkan menentukan kapasitas kabel yang dibutuhkan, dimana kapasitas hantar arus dari kabel laut harus lebih besar dari nilai tersebut namun tetap dipilih yang optimal, sehingga mencukupi selama kurun waktu rencana tanpa diperlukan adanya perubahan atau penambahan kapasitas.

2.2.3 Teknologi Penyaluran

Perdebatan klasik yang dikenal dengan istilah *War of Currents* antara Thomas Edison dan Nikola Tesla kini berevolusi menjadi diskursus mengenai sistem tegangan tinggi, khususnya dalam konteks penggunaan arus searah (DC) dan arus bolak-balik (AC). Edison (1847–1931), yang belajar secara autodidak di Cooper Union, dikenal sebagai pelopor dalam pengembangan sistem tenaga listrik berbasis DC. Di sisi lain, Tesla (1856–1943), alumni Graz University of Technology, Austria, memainkan peran krusial dalam pengembangan sistem kelistrikan berbasis AC. Keduanya berkontribusi besar dalam membentuk dasar infrastruktur kelistrikan modern saat ini. Edison mencatat sejarah dengan memperkenalkan sistem 110 V DC pada 4 September 1882, sedangkan Tesla memperkenalkan sistem dua fasa 240 V, 25 Hz AC pada 16 November 1893. Edison juga dikenal sebagai pencipta motor listrik DC, sementara Tesla

merancang motor AC yang menjadi fondasi bagi sistem kelistrikan kontemporer.



Kompetisi teknologi antara keduanya turut melibatkan perusahaan besar, General Electric mendukung sistem DC Edison, sedangkan Westinghouse mengembangkan dan menyebarkan sistem AC Tesla. Dalam upaya menyatukan kedua sistem, dikembangkan alat *converter rotary* AC/DC sebagai penghubung. Keunggulan AC dalam kemampuan transmisi daya tegangan tinggi dengan efisiensi lebih baik menjadikannya sebagai sistem yang lebih diterima secara global.

Setelah beberapa dekade, rivalitas antara sistem DC bipolar Edison dan sistem AC dua fasa Tesla muncul kembali dalam bentuk perang tegangan antara dua negara Asia, yakni Tiongkok dan India, pada era 1990-an. Munculnya sistem transmisi EHVAC (Extra High Voltage Alternating Current) dan EHVDC (Extra High Voltage Direct Current) didorong oleh kebutuhan akan efisiensi biaya investasi serta minimalisasi rugi daya dalam transmisi jarak jauh. Meskipun awalnya pengembangan jaringan transmisi lebih banyak menggunakan sistem EHVAC, seiring waktu tren tersebut mulai bergeser ke arah penggunaan saluran EHVDC, terutama untuk transmisi daya berkapasitas besar dalam jarak jauh. Dari sisi keekonomian, saluran HVDC 765 kV menjadi pilihan yang lebih efisien untuk jarak di atas 600 km, sedangkan HVDC 500 kV menjadi kompetitif setelah melewati jarak sekitar 800 km [7].

Dalam konteks nasional, rencana interkoneksi listrik 500 kV antara Jawa dan Bali (Jawa-Bali Connection) sebagaimana tertuang dalam RUPTL 2021–2030 mencakup pembangunan jaringan transmisi dari GITET Kalipuro di Jawa yang terhubung melalui Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV ke titik pendaratan (landing point) di Banyuwangi. Dari sana, energi listrik ditransmisikan melalui kabel laut 500 kV ke Gilimanuk, Bali, dan dilanjutkan ke GISTET Antosari melalui SUTET 500 kV. Sistem kabel laut 500 kV yang menjadi inti proyek JBC ini dirancang untuk menghubungkan sistem kelistrikan antar pulau yang dipisahkan oleh perairan, sehingga distribusi daya menjadi lebih merata dan andal. Teknologi kabel laut yang digunakan dapat berupa EHVAC atau EHVDC, dengan pemilihan jenis teknologi bergantung pada variabel seperti jarak tempuh, kapasitas daya yang dibutuhkan, serta kesiapan infrastruktur eksisting. EHVAC cocok untuk interkoneksi antar pulau dengan jarak pendek dan ketika sudah ada infrastruktur kelistrikan eksisting yang siap diintegrasikan, sedangkan EHVDC lebih cocok untuk transmisi jarak jauh dengan kapasitas daya besar, meskipun memerlukan investasi awal yang relatif tinggi [7].

2.3 ANALISIS EKONOMI

Analisis kelayakan ekonomi dilakukan dengan membandingkan nilai total manfaat finansial proyek terhadap nilai total biaya yang dikeluarkan selama siklus proyek. Nilai manfaat finansial proyek berupa selisih dari pendapatan penjualan energi listrik dari PLN ke pelanggan dengan Biaya Pokok Penyediaan (BPP) tenaga listrik termasuk biaya operasional dan maintenance. Analisis kelayakan menggunakan metode Discounted Cash Flow, dengan indikator Net Present Value, Internal Rate of Return, dan Payback Period. Discounted Cash Flow (DCF) adalah metode valuasi atau penilaian suatu proyek berdasarkan estimasi arus kas yang dihasilkan di masa depan. Metode DCF mengasumsikan bahwa nilai intrinsik suatu aset tergantung pada arus kas yang diharapkan di masa depan dan bahwa nilai waktu uang mempengaruhi nilai tersebut [8].

2.3.1 Net Present Value

Net Present Value (NPV) adalah metode evaluasi investasi yang digunakan untuk menentukan nilai finansial suatu proyek atau investasi dengan memperhitungkan nilai waktu uang. NPV menghitung perbedaan antara nilai kini dari arus kas yang diterima dan nilai kini dari arus kas yang dikeluarkan dalam suatu investasi atau proyek. Dalam penggunaan NPV, diasumsikan bahwa arus kas yang dihasilkan oleh investasi atau proyek tersebut direinvestasikan pada tingkat diskonto yang digunakan dalam perhitungan NPV. NPV positif menunjukkan bahwa investasi atau proyek tersebut menghasilkan keuntungan atau nilai tambah, sedangkan NPV negatif menunjukkan bahwa investasi atau proyek tersebut berpotensi merugikan [8].

$$NPV = \sum_{k=1}^n \frac{X_k}{(1+r)^k} - X_0 \quad (2.3.1)$$

2.3.2 Internal Rate Of Return

IRR (Internal Rate of Return) merupakan metode yang digunakan untuk menilai tingkat keuntungan atau tingkat pengembalian dari suatu investasi atau proyek. IRR menghitung tingkat diskonto yang akan menyebabkan nilai sekarang dari arus kas masuk dan keluar dari investasi atau proyek tersebut sama. Dalam penggunaan IRR, diasumsikan bahwa arus kas yang dihasilkan oleh investasi atau proyek tersebut akan direinvestasikan pada tingkat IRR itu sendiri. Dengan kata lain, IRR merupakan tingkat

diskonto yang membuat nilai kini arus kas masuk sama dengan nilai kini arus kas keluar. Jika IRR lebih tinggi dari tingkat pengembalian yang diharapkan atau tingkat diskonto yang digunakan dalam pengambilan keputusan, maka investasi atau proyek tersebut dianggap layak. Namun, jika IRR lebih rendah dari tingkat pengembalian yang diharapkan, maka investasi atau proyek tersebut mungkin tidak menguntungkan. Nilai IRR yang tinggi menunjukkan tingkat pengembalian yang lebih tinggi dan sebaliknya [8].

2.3.3 Payback Period

Payback Period (Periode Pengembalian Modal) adalah metode penilaian investasi yang digunakan untuk menentukan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan dana awal yang telah diinvestasikan dalam sebuah proyek atau investasi. Payback Period menghitung jumlah tahun atau periode yang dibutuhkan untuk menghasilkan arus kas yang cukup guna mencapai break-even atau menutup modal awal yang diinvestasikan. Payback Period merupakan ukuran sederhana untuk mengevaluasi kecepatan pengembalian modal pada investasi atau proyek. Keuntungan dari metode ini adalah kemudahan pemahaman dan penggunaannya. Namun, Payback Period juga memiliki keterbatasan, seperti tidak mempertimbangkan nilai waktu uang dan tidak memberikan gambaran lengkap tentang profitabilitas jangka panjang suatu investasi. Oleh karena itu, biasanya metode ini digunakan bersama dengan metode evaluasi lainnya untuk mengambil keputusan investasi yang lebih menyeluruh [8].

$$Payback = \frac{Initial\ Cost}{Annual\ Savings} \quad (2.3.3)$$