

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Terdapat berbagai studi dan penelitian telah dilakukan sebelumnya yang membahas topik-topik serupa atau memiliki keterkaitan dengan isu yang menjadi fokus penelitian ini. Hasil-hasil dari penelitian tersebut memberikan gambaran, referensi, serta landasan teoritis dan empiris yang dapat memperkaya dan mendukung pelaksanaan penelitian ini. Oleh karena itu, beberapa di antaranya akan diuraikan sebagai bahan pertimbangan dan perbandingan dalam konteks kajian yang sedang dilakukan.

2.1.1 Studi Kelayakan Rencana Elektrifikasi Daerah Operasi 1 Jakarta Untuk Kereta Rel Listrik Jalur Cikarang Sampai Cikampek

Transportasi merupakan unsur kunci dalam mendukung pertumbuhan dan mobilitas di suatu wilayah, khususnya di kota-kota metropolitan seperti Jakarta. Daerah Operasi 1 Jakarta, sebagai pusat aktivitas ekonomi dan sosial, menghadapi tantangan terkait dengan mobilitas penduduk dan dampak lingkungan. Salah satu pendekatan solusinya adalah melalui elektrifikasi jalur kereta api pada jalur strategis seperti Cikarang sampai Cikampek. Sehingga diperlukan studi kelayakan pada elektrifikasi jalur tersebut guna memahami secara mendalam kondisi teknis dan manfaat yang akan didapat. Hasil yang didapat jalur Cikarang sampai Cikampek membutuhkan gardu traksi DC sebanyak 4 unit dan jaringan *catenary* sepanjang 40,74 km dari Stasiun Cikarang sampai Stasiun Cikampek. Sedangkan hasil kelayakan finansial yang diperoleh dengan menggunakan 3 skenario yaitu optimis, moderat dan pesimis serta tanpa PSO dapat dikatakan layak yaitu hanya skenario optimis dengan discount rate 5% dan 7,5%. Untuk kelayakan finansial menggunakan PSO menunjukkan hasil dapat dikatakan layak apabila dengan subsidi PSO 45% serta *discount rate* 5% dan 7,5% karena pada semua skenario menunjukkan nilai NPV positif, BCR > 1 dan IRR diatas suku bunga bank, sedangkan dengan subsidi PSO 35% semua skenario dapat layak jika *discount rate* yang digunakan hanya sebesar 5%. Secara keseluruhan untuk kelayakan finansial dapat dikatakan layak apabila pembangunan dilakukan pemerintah dan terdapat subsidi PSO. Kondisi menunjukkan bahwa analisis kelayakan finansial dengan subsidi PSO sebesar 35% dan 45% adalah

layak pada semua skenario karena IRR berada di atas 6% yang merupakan tingkat bunga yang dipersyaratkan (Raharjo, 2024).

2.1.2 Studi Perencanaan Kebutuhan Gardu Traksi Guna Mendukung Elektrifikasi Jalur Kereta Api Yogyakarta-Kutoarjo

Berdasarkan data dari Balai Teknik Perkeretaapian Kelas I Semarang Pada tahun 2023 terdapat perpindahan orang dengan kereta perkotaan Prambanan Ekspres dari Yogyakarta menuju Kutoarjo ataupun sebaliknya sebanyak 884.626 orang dan 2.462.228 orang dengan menggunakan kereta bandara dari Yogyakarta menuju bandara YIA ataupun sebaliknya. Penelitian ini membahas kebutuhan gardu traksi sebagai suplai tenaga listrik 1500 VDC ke KRL. Model sebagai sistem kelistrikan gardu traksi dengan parameter kebutuhan tegangan, arus dari KRL, jatuh tegangan, jarak ideal antar gardu traksi serta spesifikasi peralatan penyearah. Metode analisa dilakukan dengan melakukan perhitungan terhadap kebutuhan daya KRL, jarak ideal antar gardu berdasarkan jatuh tegangan yang diijinkan dengan menggunakan teori yang relevan berdasarkan data lintas, spesifikasi teknis sarana serta spesifikasi prasarana yang telah ada. Hasil analisa pada penelitian ini, jarak ideal antar gardu untuk menghindari jatuh tegangan sesuai yang diijinkan adalah 20,59 km untuk KRL dengan 4 stamformasi dan 9,55 km untuk KRL dengan 8 stamformasi. Dibutuhkan 12 gardu traksi dengan daya masing-masing gardu traksi 4000 kW untuk dapat melayani operasi perjalanan kereta api *headway* hingga 15 menit, dengan prediksi operasi gardu traksi dapat mencapai 99,36% saat KRL melakukan akselerasi. Kebutuhan daya ketika terdapat 2 KRL berada di petak suplai yang sama saat ber samaan dapat mencapai 2649,6 kW dengan presentasi 66,24% dari kapasitas daya gardu traksi (Setiawan, 2024).

2.1.3 Perencanaan Penggunaan PLTS Di Stasiun Kereta Api Cirebon Jawa Barat

Pemanfaatan teknologi sel surya sebagai sumber energi listrik di Indonesia masih belum berkembang baik padahal Indonesia terletak di garis khatulistiwa sehingga mendapat sinar matahari yang melimpah. Teknologi yang patut dipertahankan untuk masa depan adalah teknologi ramah lingkungan, salah satunya PLTS. PLTS adalah sistem pembangkit listrik yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik melalui *photovoltaic module* yang termasuk dalam *green energy* sehingga menjadi suatu pembangkit yang terbarukan. Hasil penelitian menunjukkan untuk saat ini penggunaan

sistem PLTS khususnya di stasiun kereta untuk memenuhi kebutuhan listriknya tidak menguntungkan secara ekonomis. Hal ini karena tingginya biaya investasi sistem PLTS dibandingkan dengan biaya listrik yang dibeli dari sumber konvensional. Berdasarkan aspek ekonomis, perencanaan ini membutuhkan biaya investasi sebesar Rp. 1.278.710.000 untuk sistem PLTS kebutuhan daya listrik kegiatan utama berupa alat-alat yang penting. Perencanaan ini bersifat menguntungkan jika dikembangkan dan pengembalian modal terjadi pada tahun ke-22 dari umur proyek 25 tahun. Keuntungan pertahun diperoleh dari bunga sebesar 11% (Syamsudin, 2018).

2.1.4 Analisis Dampak Kebijakan Implementasi PLTS Atap pada Gedung Pemerintah menggunakan Skenario Proyeksi

Pemerintah masih tetap akan melakukan implementasi PLTS Atap pada 30% dari luas atap bangunan/gedung pemerintah sedangkan implementasi peraturan Menteri ESDM tentang PLTS Atap yang masih tertunda atau tidak maksimal dikarenakan ketidakpastian yang tinggi dari dampak implementasinya atas demand PLN. Terkait itu perlu dilakukan analisis skenario proyeksi pertumbuhan PLTS Atap pada Gedung pemerintah menggunakan pendekatan pertumbuhan PLTS Atap di Asia menjadi empat skenario proyeksi dengan kombinasi tahun awal implementasi (laju pertumbuhan) yaitu: 2026 (8,88%), 2031 (26,91%), 2032 (13,11%) dan 2022 (mengikuti pertumbuhan pelanggan). Dari hasil perhitungan potensi untuk pelanggan PLN P1 mulai dari 2.567,32 MWh hingga 757.816,08 MWh dan Pelanggan PLN P2 sebesar 884,82 MWh hingga 20.331,10 MWh. Dampak terhadap demand PLN khususnya pelanggan P1 dan P2, dari seluruh skenario mengakibatkan pelanggan dapat memenuhi kebutuhan listriknya secara mandiri pada beberapa tahun setelah implementasi sebelum tahun 2050 kecuali pelanggan P1 untuk skenario 3 (Ilham & Batih, 2023).

2.1.5 Analisis Pengaruh Tutupan Awan Terhadap Radiasi Matahari di Kota Pontianak

Telah dilakukan penelitian tentang pengaruh tutupan awan terhadap radiasi matahari di Kota Pontianak. Data yang digunakan adalah tutupan awan yang diperoleh dari satelit ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*) dan radiasi matahari yang diperoleh dari satelit NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration's*). Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui pengaruh tutupan awan

terhadap radiasi matahari dan mengetahui potensi energi matahari selama lima tahun (2012-2016). Penelitian ini menggunakan metode regresi linier sederhana yang menghasilkan nilai korelasi rata-rata bulanan sebesar -0,73 untuk tutupan awan rendah dan -0,22 untuk tutupan awan tinggi. Nilai korelasi -0,73 mempengaruhi radiasi matahari karena tutupan awan rendah lebih banyak memantulkan gelombang pendek dari matahari dan lebih banyak meneruskan gelombang panjang dari bumi, sedangkan nilai korelasi -0,22 sangat kecil mempengaruhi radiasi matahari karena tutupan awan tinggi lebih banyak meneruskan gelombang pendek dari matahari dan memantulkan gelombang panjang dari bumi. Dari penelitian ini diperoleh nilai rata-rata radiasi matahari bulanan di Kota Pontianak adalah sebesar 644,48 Watt/m² sedangkan nilai rata-rata energi matahari bulanan sebesar 464,03 kWh/m² per bulan (Reni Anggreni, Muliadi, 2018).

2.2 Landasan Teori

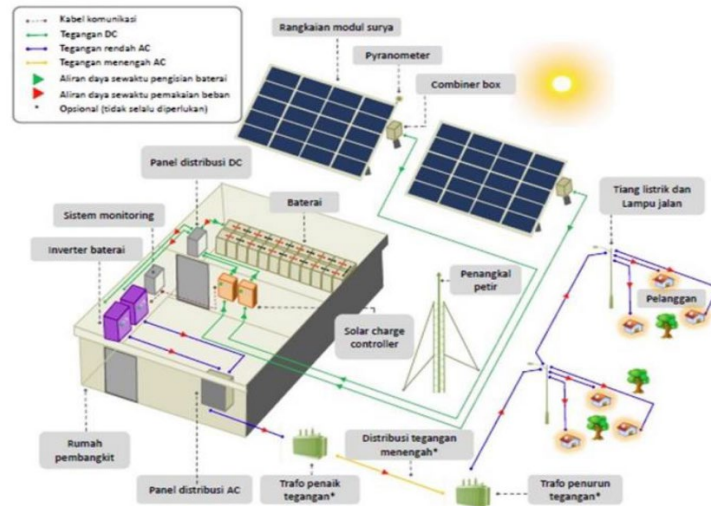
Sebagai dasar konseptual dan kerangka pemikiran dalam penelitian ini, penyusunan landasan teori bertujuan untuk memberikan pemahaman mengenai konsep, prinsip, relevan dengan topik studi terkait.

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik menggunakan modul fotovoltaik/*photovoltaic* (PV). PLTS termasuk dalam pembangkit energi terbarukan karena memanfaatkan sumber daya alam yang tidak terbatas dan ramah lingkungan. *Photovoltaic* (PV) adalah teknologi yang berfungsi sebagai pengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung yang menghasilkan arus listrik searah/*direct current* (DC). Energi listrik kemudian dirubah menjadi arus bolak balik/*alternating current* (AC) menggunakan *inverter*, sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, perkantoran, industri maupun disalurkan ke jaringan listrik umum (*on-grid*).

PV biasanya dikemas dalam sebuah unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang bisa disusun secara seri maupun paralel. Sejumlah modul umumnya terdiri dari 36 sel surya atau 33 sel dan 72 sel. Penempatan panel PV yang optimal juga dapat memberikan dampak penyerapan energi radiasi matahari yang baik. Panel PV dapat dipasang di atas permukaan tanah (*ground mounted solar PV*), atap rumah/bangunan (*rooftop solar PV*) atau bahkan di terapung permukaan air (*floating*

solar PV). Pola pembangkitan energi surya menggunakan sistem PV dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Pola Pembangkitan PLTS
Sumber: Buku Pedoman Pengawasan Proyek PLTS (PLN Pusmanpro, 2023)

Adapun beberapa faktor yang dapat mempengaruhi produksi listrik pada sistem PV yaitu:

a. Intensitas Radiasi Matahari

Semakin tinggi intensitas sinar matahari yang diterima panel PV, semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan. Nilai iradiasi yang besar yaitu pada penyinaran langsung tegak lurus ke permukaan PV atau dapat disebut *Direct Normal Irradiance*, dinyatakan dalam satuan kWh/m²/hari. Di Indonesia, nilai rata-rata berkisar antara 4–5,5 kWh/m²/hari tergantung lokasi.

b. Luas area Panel Terpasang

Luas panel PV yang dipasang berbanding lurus dengan nilai energi listrik yang akan dihasilkan.

c. Kualitas dan Jenis Modul PV

Proporsi sinar matahari yang diserap dan dikonversikan menjadi listrik pun mendapat pengaruh dari efisiensi bahan PV yang digunakan. Berbagai bahan tersebut dapat berupa monokristalin, polikristalin, *amorphous*, *gallium arsenide* (IT PLN, 2021). Ketahanan panel surya pada umumnya dapat mencapai umur 25-30 tahun. Dari masing-masing jenis bahan yang telah disebutkan dapat dilihat perbandingannya pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Perbandingan Bahan Modul PV

Jenis Modul PV	Efisiensi Rata-rata	Keterangan
monokristalin,	18% - 23%	Efisiensi tertinggi di pasar komersil
polikristalin,	15% - 18%	Efisiensi lebih rendah dibandingkan dengan mono
<i>amorphous</i>	6% - 10%	Harga murah, namun efisiensi rendah
<i>gallium arsenide</i>	25% - 29%	Sangat efisien, namun harga mahal

d. Arah dan Kemiringan Panel (Orientasi dan *Tilt Angle*)

Panel yang menghadap ke arah optimal (di Indonesia menghadap arah Utara) dengan sudut kemiringan yang sesuai (sekitar lintang lokasi, misalnya 6° – 15°) akan menangkap lebih banyak sinar matahari sepanjang tahun.

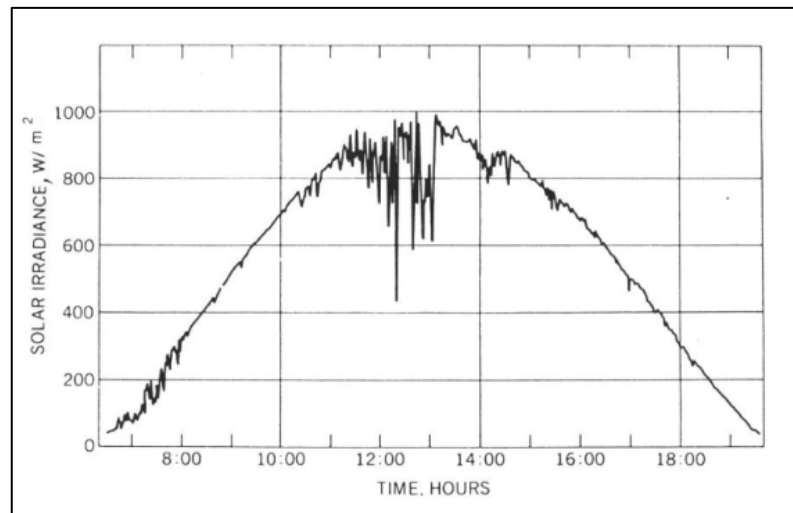
2.2.2 Pemulihan Intermittensi PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki sifat intermiten, yaitu fluktuasi daya yang dihasilkan akibat pengaruh kondisi cuaca, posisi matahari, serta siklus siang dan malam. Intermittensi ini menimbulkan ketidakstabilan suplai energi yang dapat mempengaruhi keandalan sistem kelistrikan, terutama jika PLTS digunakan pada beban kritis seperti sistem elektrifikasi Kereta Rel Listrik (KRL).

Menurut Dadan (Sekjen Kemen ESDM), faktor utama intermittensi pada PLTS sebenarnya dipengaruhi oleh faktor cuaca. Walaupun keluaran daya PLTS adalah intermiten yang sangat berfluktuasi, namun jika jumlah pembangkitnya banyak dan tersebar luas (secara geografis), daya yang dihasilkan secara agregat akan lebih halus. Pada PLTS, tutupan awan akan membuat daya turun pada titik tersebut, namun di area lain yang cerah tetap menghasilkan daya maksimal. Efek ini kita sebut *smoothing* (IEA, 2011).

Oleh karena itu, pemasangan PLTS secara tersebar di lokasi-lokasi strategis diyakini tidak akan menyebabkan terjadi intermittensi pada sistem kelistrikan yang ada. Secara teoritis, pemulihan intermittensi PLTS dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan utama. Pertama, integrasi sistem penyimpanan energi seperti baterai, *flywheel energy storage system*, atau *pumped hydro storage*, yang berfungsi menyerap kelebihan energi saat produksi tinggi dan melepaskannya kembali saat produksi menurun. Kedua,

skema interkoneksi dengan jaringan yaitu PLTS dihubungkan dengan jaringan listrik utama (misalnya PLN) untuk menjamin suplai saat produksi PLTS tidak mencukupi. Ketiga, manajemen beban cerdas (*smart load management*), yaitu penyesuaian beban operasional agar sinkron dengan ketersediaan energi dari PLTS. Grafik intermitensi dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Kurva Intermitensi Iradiasi Matahari

Sumber: <https://gautamakarisma.wordpress.com/2013/11/27/plts-daya-dan-energi/>

Berdasarkan kurva iradiasi tersebut, terdapat ketidak konsistenan suplai energi matahari yang ditangkap dalam sehari. Untuk mengatasi fluktuasi dari nilai iradiasi yang diterima, maka pemasangan PLTS dengan sebaran yang banyak di berbagai daerah dapat dilakukan sehingga kurva iradiasi pemulihan suplai listrik dari energi matahari menjadi lebih stabil pada waktu/jam optimal di siang hari. Hal tersebut menjadi kunci keberlanjutan dalam mengintegrasikan energi surya pada sistem transportasi berbasis listrik.

2.2.3 Sistem Elektrifikasi Kereta Rel Listrik (KRL)

Elektrifikasi kereta adalah proses transformasi sistem mekanisme pendorong berbasis bahan bakar fosil menjadi sistem tenaga listrik. Pada jalur KRL, energi listrik digunakan untuk menggerakkan motor traksi melalui sistem *overhead catenary*/Listrik Aliran Atas (LAA) atau *third rail*/sistem rel ketiga sejajar dengan rel, tergantung desain sistem. Prasarana elektrifikasi dipasang di sepanjang jalur rel KRL yang kemudian mengalir listrik melalui media pantograf yang terpasang di atap garbong KRL. Keunggulan kereta rel listrik dibandingkan dengan kereta diesel konvensional yang saat ini digunakan untuk jalur jarak jauh jika dilihat dari beberapa aspek dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Perbandingan KRL dan KRD

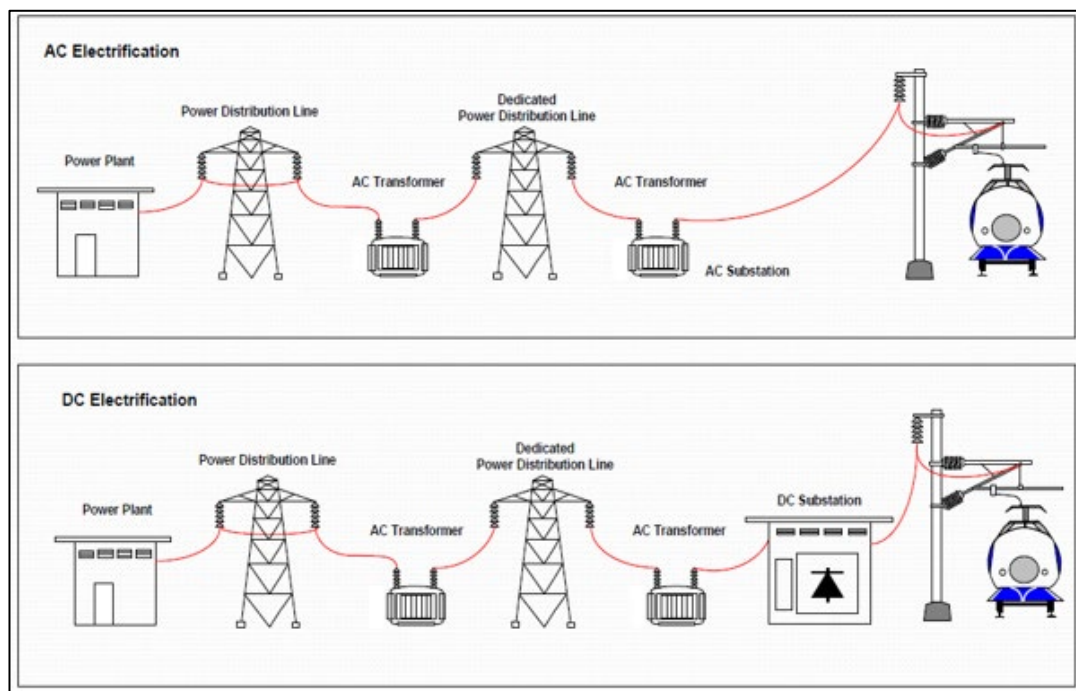
Aspek	KRL (Kereta Rel Listrik)	KRD (Kereta Rel Diesel)
Emisi Karbon	Rendah (nyaris nol di titik operasi)	Tinggi (CO ₂ , NO _x , partikulat)
Kebisingan	Sangat rendah <90 db	Cukup tinggi (terutama saat akselerasi) >100 db
Efisiensi Energi	Tinggi (75–90%)	Lebih rendah (30–40%)
Biaya Operasional	Lebih murah (tergantung harga listrik)	Lebih mahal (tergantung harga BBM)
Kemandirian Operasional	Bergantung pada jaringan listrik	Mandiri, bisa beroperasi tanpa elektrifikasi
Keberlanjutan Jangka Panjang	Sangat baik (bisa gunakan energi terbarukan)	Tidak ramah lingkungan dalam jangka panjang

Sistem elektrifikasi pada kereta rel listrik (KRL) diklasifikasikan menjadi dua jenis utama berdasarkan jenis arus listrik yang digunakan, yaitu arus searah (DC) dan arus bolak-balik (AC). Di Indonesia, penggunaan sistem 1500 Volt DC menjadi yang paling dominan, seperti contohnya pada rute KRL di wilayah Jabodetabek dan jalur menuju Bandara Soekarno Hatta. Dalam konfigurasi ini, energi listrik disalurkan dari jaringan PLN ke gardu traksi, kemudian dikonversi dari arus AC menjadi DC menggunakan perangkat penyearah (*rectifier*), sebelum dialirkan ke kereta melalui Listrik Aliran Atas (LAA) dan pantograf. Sebaliknya, sistem 25000 Volt AC (25 kV AC) lebih umum diterapkan pada jalur antar kota dan kereta dengan kecepatan tinggi. Keunggulan utama dari sistem ini terletak pada efisiensi transmisinya yang lebih tinggi, tegangan yang besar memungkinkan penyaluran daya dengan kehilangan energi yang minimal, serta memerlukan jumlah gardu traksi yang lebih sedikit. Oleh karena itu, pemilihan antara sistem AC dan DC perlu mempertimbangkan aspek teknis, biaya investasi, kompatibilitas dengan sistem yang ada, serta kebutuhan operasional jalur yang akan dilayani. Seperti yang ada pada Tabel 2.3 menampilkan perbandingan antara sistem arus AC dan DC pada KRL.

Tabel 2. 3 Perbandingan Sistem AC dan DC

Aspek	Sistem DC	Sistem AC
Tegangan Umum	600 V, 750 V, 1.500 V DC	15 kV, 25 kV AC
Aplikasi di Indonesia	Jabodetabek, Bandara Soekarno-Hatta	KCJB (Jakarta-Bandung)
Kesesuaian untuk Kecepatan	Kecepatan rendah–menengah (< 120 km/jam)	Kecepatan tinggi (> 120 – 350) km/jam)
Kompleksitas Gardu Traksi	Membutuhkan banyak gardu penyearah DC	Trafo tegangan tinggi langsung ke jaringan <i>catenary</i> /LAA
Jarak antar Gardu	Pendek (5–15 km), karena <i>losses</i> tinggi	Panjang (30–60 km), efisiensi transmisi tinggi
Kebutuhan <i>Inverter/Rectifier</i>	Perlu rectifier (AC → DC) di gardu	Tidak perlu rectifier (langsung dari jaringan)
Biaya Infrastruktur Awal	Lebih rendah (pada jarak pendek dan area urban)	Lebih tinggi (butuh isolasi tinggi)
Efisiensi Transmisi Jarak Jauh	Kurang baik (karena <i>drop voltage</i>)	Sangat baik (tegangan tinggi, <i>losses</i> rendah)
Kompatibilitas Sistem Lama	Tinggi (banyak sistem lama berbasis DC)	Perlu adaptasi untuk sistem eksisting

Kelengkapan prasarana elektrifikasi KRL merupakan komponen fisik dan sistem pendukung yang memungkinkan penyaluran daya listrik dari sumber hingga ke rangkaian kereta secara aman, andal, dan efisien. Menurut Dirjen Perkeretaapian (2020), prasarana utama elektrifikasi KRL meliputi gardu traksi sebagai titik konversi daya dari jaringan umum (PLN) menjadi tegangan kerja sistem traksi (1.500 VDC, 25 kVAC, atau lainnya), sistem Listrik Aliran Atas (LAA) yang terdiri dari kawat kontaktor, kawat penyangga, isolator, tiang penyangga, dan perangkat penegang untuk memastikan kontak yang stabil dengan pantograf kereta, serta jalur rel dan peron yang telah disesuaikan dengan standar dimensi kereta, tinggi peron, dan geometri lintasan. Ilustrasi rangkaian sistem AC dan DC pada KRL dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Sistem AC dan DC pada KRL
Sumber: PT KAI (Persero)

Sementara itu untuk jenis KRL terdapat beberapa alternatif yang dapat digunakan sebagai sarana transportasi angkutan penumpang. Jenis rangkaian KRL/*trainset* dibedakan berdasarkan kecepatan dan tegangan operasinya seperti yang terdapat pada Tabel 2.4

Tabel 2. 4 Jenis-jenis Trainset

Jenis Kereta	Tegangan Operasi	Kecepatan Operasi	Keterangan
JR 205	1,5 kV DC	70-90 km/jam	Kereta Commuter
EMU Class 93	25 kV AC	145-160 km/jam	Kereta semi cepat antar kota
EMU CR400AF	27,5 kV AC	350 km/jam	Kereta cepat antar kota

2.2.4 Kelayakan Finansial Elektrifikasi KRL

Kelayakan finansial pada proyek elektrifikasi kereta api merupakan kajian yang bertujuan untuk menilai tingkat kelayakan pelaksanaan proyek dari sisi ekonomi dan investasi. Analisis ini membandingkan total biaya, yang mencakup nilai biaya investasi awal (*Capital Expenditure* – CAPEX) serta biaya operasional dan pemeliharaan tahunan (*Operational Expenditure* – OPEX), dengan manfaat finansial yang dihasilkan sepanjang

umur proyek. Berdasarkan *Asian Development Bank* (2019) dan Direktorat Jenderal Perkeretaapian (2020), indikator utama dalam penilaian meliputi *Net Present Value* (NPV), *Benefit-Cost Ratio* (BCR), *Internal Rate of Return* (IRR) dan *Payback Period* (PP). Secara teoretis, beberapa faktor kunci yang sangat memengaruhi kelayakan finansial elektrifikasi KRL adalah:

a. Volume dan pertumbuhan demand penumpang

Pendapatan tiket sangat bergantung pada jumlah penumpang dan elastisitas permintaan terhadap perubahan tarif dan kualitas layanan. Evaluasi rail project menekankan pentingnya prakiraan permintaan yang hati-hati karena kesalahan prediksi demand adalah sumber utama ketidakpastian NPV.

b. Struktur tarif dan kebijakan subsidi

Pada banyak sistem KRL, tarif ditetapkan pemerintah dan tidak sepenuhnya merefleksikan biaya marginal operasi. Dari sudut pandang proyek, pendapatan yang diterima operator (setelah subsidi) menjadi faktor kunci dalam cash flow finansial.

c. Perbandingan biaya energi listrik vs diesel.

Semakin besar gap biaya energi yang dihemat (diesel yang digantikan listrik), semakin besar manfaat finansial elektrifikasi. Studi dan berita terbaru dari Indian Railways menunjukkan penghematan jutaan liter diesel dan ratusan miliar rupiah ekuivalen biaya setelah elektrifikasi penuh suatu divisi operasi.

d. Integrasi dengan sumber energi terbarukan (misalnya PLTS atap/*utility-scale*)

Elektrifikasi KRL membuka peluang integrasi dengan sumber energi rendah karbon seperti PLTS atap di stasiun, depo, dan bangunan pendukung, yang dapat mengurangi biaya energi jangka panjang dan meningkatkan profil keberlanjutan proyek (misalnya target net-zero emission).