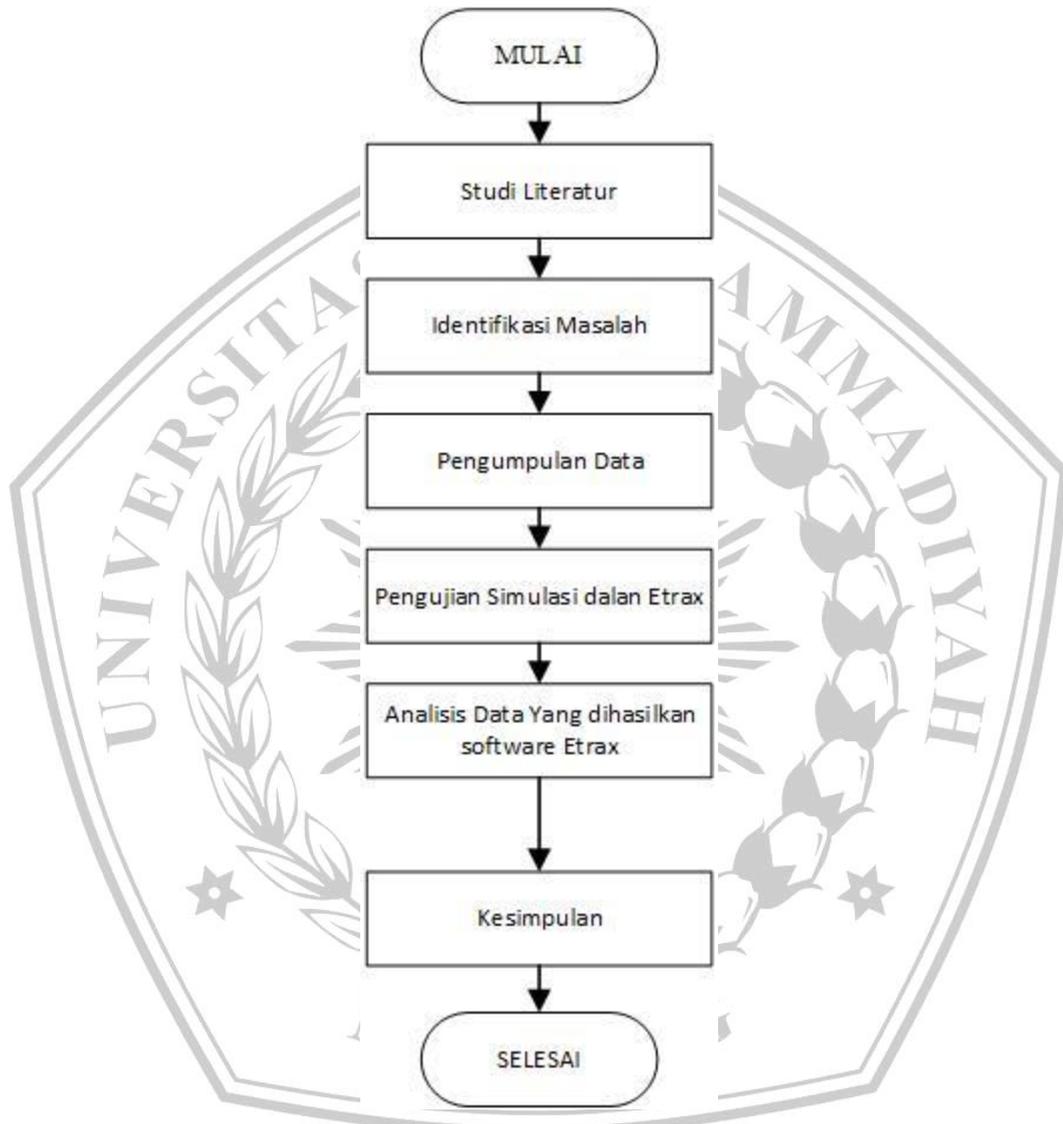


BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

Sumber: Data diolah

Flowchart di atas menggambarkan alur penelitian atau proses yang dilakukan dalam penelitian berbasis simulasi menggunakan software Etrax. Berikut penjelasan rinci dari setiap langkah dalam flowchart tersebut:

1. Mulai: Penelitian dimulai dengan perumusan dan persiapan rencana penelitian secara umum. Tahap ini menjadi titik awal dari seluruh proses untuk mencapai tujuan akhir penelitian.
2. Studi Literatur: Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan informasi dari berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal, buku, dan artikel penelitian. Studi literatur bertujuan untuk memahami dasar teori yang relevan, mengetahui penelitian terdahulu yang sudah dilakukan, serta meninjau metode dan hasil yang berkaitan dengan penelitian. Ini penting untuk mendasari penelitian dan membantu dalam merumuskan masalah.
3. Identifikasi Masalah: Berdasarkan hasil studi literatur, peneliti mengidentifikasi masalah atau gap yang ditemukan dalam penelitian sebelumnya. Tahap ini berfokus pada perumusan masalah utama yang akan diselesaikan dalam penelitian, termasuk batasan-batasan dan tujuan yang akan dicapai.
4. Pengumpulan Data: Setelah masalah diidentifikasi, data yang dibutuhkan untuk penelitian dikumpulkan. Data ini dapat berupa data primer yang didapatkan dari eksperimen atau observasi langsung, serta data sekunder dari sumber-sumber literatur lain. Pengumpulan data menjadi dasar untuk menjalankan simulasi dan analisis lebih lanjut.
5. Pengujian Simulasi dalam Etrax: Pada tahap ini, data yang telah dikumpulkan digunakan dalam simulasi dengan software Etrax. Etrax digunakan untuk memodelkan sistem, melakukan analisis kelistrikan dinamis, dan menguji skenario-skenario tertentu yang berkaitan dengan penelitian. Simulasi ini akan memberikan hasil berupa output performa sistem yang disimulasikan.
6. Analisis Data yang Dihasilkan dari Software Etrax: Data hasil simulasi dianalisis untuk melihat pola, tren, atau kesimpulan yang dapat diambil dari output simulasi tersebut. Tahap ini sangat penting untuk memahami bagaimana sistem bekerja dalam simulasi dan untuk mengevaluasi apakah tujuan penelitian sudah tercapai. Analisis ini mencakup perbandingan dengan data atau teori yang ada.

7. Kesimpulan: Berdasarkan hasil analisis, peneliti membuat kesimpulan akhir yang merangkum temuan utama dari penelitian. Kesimpulan ini menjawab pertanyaan atau masalah yang telah diidentifikasi sebelumnya dan memberikan rekomendasi untuk penelitian lanjutan atau aplikasi praktis dari hasil yang didapatkan.
8. Selesai: Setelah kesimpulan dicapai, penelitian dinyatakan selesai. Pada tahap ini, seluruh hasil penelitian dapat didokumentasikan dan dipublikasikan jika diperlukan.

Flowchart ini merepresentasikan urutan logis dari langkah-langkah yang harus ditempuh dalam penelitian berbasis simulasi untuk mencapai hasil yang valid dan akurat.

3.2 Jenis Penelitian

Pada penelitian ini Simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan software Etrax bertujuan untuk memodelkan secara menyeluruh operasi gardu traksi, rangkaian kereta, dan rute yang dilalui oleh kereta. Etrax adalah software yang dirancang khusus untuk menganalisis sistem kelistrikan pada kereta, terutama dalam simulasi aliran daya dan beban dinamis yang terjadi selama operasional kereta. Dengan memodelkan gardu traksi, software ini memungkinkan penelitian untuk memeriksa bagaimana suplai listrik dari gardu ke kereta dikelola dan didistribusikan secara efisien, sekaligus mempertimbangkan fluktuasi beban yang dinamis karena perubahan kecepatan, tanjakan, atau kondisi perjalanan lainnya.

Lebih lanjut, dengan integrasi Etrax ke dalam sistem geospasial, simulasi yang dilakukan tidak hanya bersifat teoretis, tetapi juga mampu merepresentasikan kondisi riil di lapangan. Hal ini sangat berguna untuk mensimulasikan jalur rute kereta yang spesifik, termasuk faktor-faktor geografis seperti elevasi, kelengkungan rel, dan panjang rute. Kondisi geospasial ini memberikan akurasi lebih dalam memprediksi beban dinamis yang dihadapi kereta saat melalui rute tertentu, serta bagaimana konsumsi daya dan traksi berubah berdasarkan kondisi nyata. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan hasil simulasi yang lebih relevan dan aplikatif. Selain itu, simulasi menggunakan Etrax dapat menganalisis performa sistem kelistrikan secara detail, seperti pengaruh gardu traksi dalam menjaga kestabilan suplai listrik, pengaruh rute terhadap konsumsi energi kereta, serta

kinerja motor traksi saat menghadapi berbagai medan. Hasil dari simulasi ini juga dapat digunakan untuk mengoptimalkan desain gardu traksi, konfigurasi rangkaian kereta, serta pengaturan operasional kereta untuk mencapai efisiensi energi yang lebih baik.

Secara keseluruhan, penggunaan Etrax dalam penelitian ini memberikan gambaran yang komprehensif tentang bagaimana sistem kelistrikan kereta berfungsi dalam kondisi dinamis yang menyerupai situasi nyata. Dengan kemampuan untuk mensimulasikan aliran daya, beban dinamis, dan integrasi dengan data geospasial, hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan solusi yang aplikatif untuk meningkatkan efisiensi energi serta kinerja sistem kelistrikan pada kereta, khususnya di jalur yang telah dimodelkan.

3.3 Sistem Pengoperasian Kereta Rel Listrik

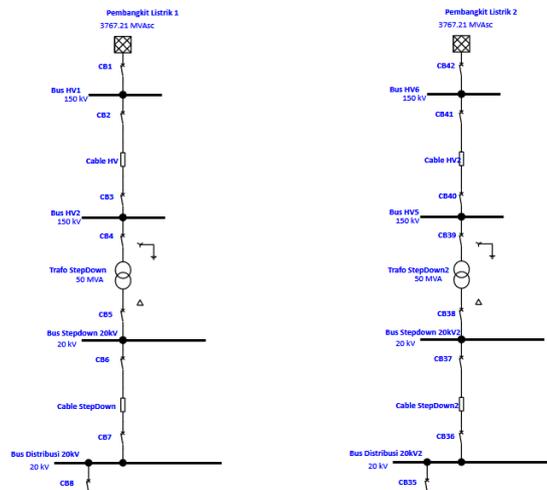
Dalam penelitian ini, model simulasi sistem kereta Rel Listrik (KRL) telah dimodelkan menggunakan perangkat lunak ETAP-eTraX. Dalam studi ini akan mensimulasikan kereta dengan panjang rel lintasan 6 kilometer. Dimana dalam panjang lintasan rel 6 kilometer terdapat 4 stasiun pemberhentian dengan jarak yang berbeda - beda. Berikut ini merupakan table antar stasiun:

Tabel 3.1 Panjang Lintasan dan Kecepatan pada setiap stasiun.

Stasiun	Panjang Lintasan	Kecepatan
A ke B	468 m	35 km/j
B ke C	1146 m	75 km/j
C ke D	4398 m	120 km/j

Sistem kelistrikan didasarkan pada sistem Listrik Aliran Atas (LAA) 1500V DC, yang umum digunakan dalam sistem kereta api perkotaan di seluruh dunia. Tenaga listrik untuk sistem kereta rel listrik dipasok oleh PLN, perusahaan listrik nasional yang ada di Indonesia. Tenaga yang diterima dari PLN diubah dari AC ke DC melalui jaringan gardu induk yang terletak di sepanjang jalur. Gardu induk kemudian menyediakan pasokan daya yang stabil dan andal ke kereta melalui LAA. Selain itu, sistem kereta DC di Indonesia juga dilengkapi dengan energi

pengereman regeneratif, yang memungkinkan kereta memulihkan energi saat melakukan pengereman dan mengembalikannya ke jaringan listrik. Hal ini membantu mengurangi konsumsi energi dan menurunkan biaya operasional bagi operator kereta api.



Gambar 3.2 Sistem Transmisi Power Plant ke Gardu 20kV

Power plant adalah bagian yang menghasilkan sumber energi listrik. Tenaga listrik ini akan disalurkan melalui saluran transmisi yaitu power distribution line. Dalam penyaluran ini setelah ditransmisi dan mendekati beban tegangan diturunkan dengan trafo step down menjadi (20 KVAC). Tegangan incoming pada DC substation adalah 20 KVAC dan akan diturunkan menjadi 1200 VAC oleh transformator step down yang kemudian dikonversi dari tegangan AC menjadi DC dengan menggunakan Silicon Rectifier, dari proses ini maka didapat tegangan 1500 VDC.

Pehitungan kapasitas daya listrik pada gardu traksi KRL dilakukan dengan menggunakan pendekatan empiris.

1. Untuk mencari beban maksimum dalam satuan KW pada gardu traksi, dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Y = C \times D \times (60/H) \times P \times (W/1000) \quad (1)$$

Keterangan:

Y = Beban maksimum dalam satuan KW.

C = Susunan rangkaian (set).

D = Jarak pengisian gardu traksi (km).

H = Headway (menit).

N = Jenis jalur 2 (Double Track), 1 (Single Track).

P = Rasio konsumsi kereta (50 KWH/1000 ton km).

W = Berat total KRL ditambah berat total penumpang (kapasitas 200%) dengan asumsi rata-rata berat penumpang 60kg/orang.

2. Untuk mencari arus maksimum, maka rumus yang akan digunakan seperti dibawah:

$$I_m = \text{Total Daya/Teg Nominal} \quad (2)$$

3. Untuk mencari beban puncak sesaat berdasarkan arus maksimum maka rumus yang digunakan seperti berikut:

$$Z = 1,5 \text{ kW} \times 2I_m(1-\alpha) \text{ (kW)} \quad (3)$$

$$Z_n = Z/2.5(4)$$

Keterangan:

Z = Beban puncak sesaat berdasarkan arus maksimum (KW).

Z_n = Beban yang dibutuhkan (KW).

I_m = Arus maksimum KRL (Ampere).

α = Rasio pembagian arus, akan digunakan 0,08

3.4 Permodelan Sistem Tenaga pada Kereta Rel Listrik

Seluruh permintaan daya sistem kereta listrik disediakan oleh gardu induk 150/20kV dengan dua transformator 50 MVA dan satu transformator 40 MVA masing-masing. Power plant memasok ke 3 gardu induk pasokan daya traksi 20kV. Gardu 20kV kemudian menyalurkan daya ke sistem tegangan incoming pada DC substation yang merupakan 20 kV yang kemudian dikonversi dari tegangan AC menjadi DC dengan menggunakan Silicon Rectifier, dari proses ini maka didapat tegangan 1500 VDC.

Tabel 3.2 Transformator Auxiliary 20kV/0,4kV

Parameters	Nilai
Power Rating (MVA)	0,16
Primary Voltage (kV)	20
Secondary Voltage (kV)	0,4

Zero Sequence Impedance (%)	80
X/R Ratio	1,5
Impedance Tolerance (%)	± 10
Tap Range (%)	$\pm 7,5$

Tiga transformator auxiliary ini berfungsi sebagai perangkat utama yang mengubah tegangan tinggi 20 kV dari gardu induk menjadi tegangan rendah 0,4kV. Tegangan rendah ini diperlukan untuk menyediakan daya listrik pada sistem operasional kereta, seperti penerangan, sistem pendingin udara, kontrol, dan perangkat elektronik lainnya yang membutuhkan tegangan lebih rendah. Proses konversi ini sangat penting karena komponen-komponen di dalam kereta umumnya tidak didesain untuk bekerja pada tegangan tinggi seperti 20kV. Melalui transformator auxiliary, listrik yang dihasilkan dari gardu induk dapat disesuaikan dan dialirkan dengan aman ke berbagai sistem dan perangkat di kereta. Selain itu, transformator auxiliary juga dilengkapi dengan perlindungan yang dirancang untuk menghindari kerusakan akibat lonjakan tegangan atau gangguan listrik lainnya. Perlindungan ini mencakup pemutus sirkit dan penangkal petir untuk menjaga kestabilan suplai listrik ke kereta selama beroperasi.

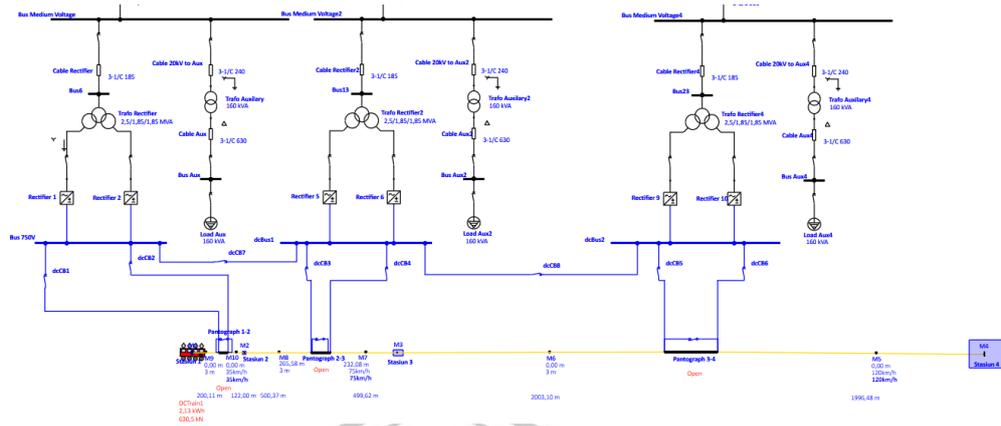
Tabel 3.3 Transformator Stepdown 20kV/1,2kV

Parameters	Transformator
Power Rating (MVA)	2,3/1,15/1,15
Primary Voltage (kV)	20
Secondary Voltage (kV)	1,2
Positive Sequence Impedance (%)	6
Zero Sequence Impedance (%)	80
X/R Ratio	10
Impedance Tolerance (%)	± 10
Tap Range (%)	$\pm 7,5$

Transformator step down 20kV/1,2kV memiliki peran krusial dalam sistem kelistrikan kereta listrik, terutama untuk menurunkan tegangan tinggi dari gardu

induk menjadi tegangan yang lebih rendah dan dapat diolah lebih lanjut oleh perangkat rectifier. Pada tahap pertama, tegangan 20kV dari gardu induk masuk ke transformator step down, di mana tegangan ini dikonversi menjadi 1,2kV pada sisi sekunder transformator. Penurunan tegangan ini diperlukan agar sesuai dengan kapasitas input dari sistem rectifier, yang akan mengubah arus AC (Alternating Current) menjadi arus DC (Direct Current) yang dibutuhkan oleh motor traksi dan sistem listrik kereta lainnya. Setelah tegangan AC 1,2kV dihasilkan oleh transformator step down, tegangan ini dialirkan ke perangkat rectifier. Di dalam rectifier, tegangan AC tersebut mengalami proses rektifikasi melalui komponen seperti dioda atau thyristor yang berfungsi mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC. Rectifier ini mengonversi tegangan 1,2kV AC menjadi tegangan 1500V DC, yang merupakan tegangan standar yang digunakan untuk menggerakkan motor traksi kereta listrik. Tegangan DC ini stabil dan cocok untuk menggerakkan motor-motor listrik yang menggerakkan roda kereta, sehingga kereta dapat beroperasi secara efisien.

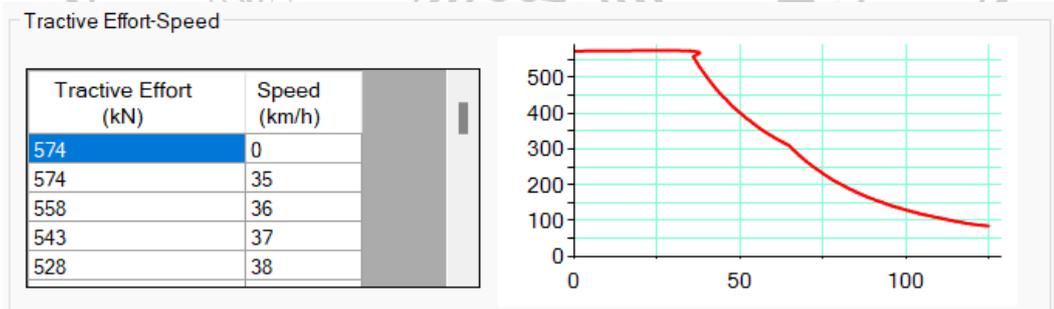
Tegangan 1500V DC yang dihasilkan oleh rectifier digunakan untuk menyuplai daya langsung ke motor traksi kereta, yang membutuhkan tegangan searah (DC) untuk bekerja. Motor traksi ini mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang menggerakkan roda kereta. Selain itu, suplai DC ini juga dapat digunakan untuk mengisi baterai-baterai sistem backup serta menyuplai peralatan operasional yang lain di dalam kereta, seperti sistem kontrol dan perangkat keamanan. Sistem stepdown-transformator dan rectifier ini juga dilengkapi dengan berbagai perlindungan untuk mencegah kerusakan akibat gangguan listrik, seperti lonjakan tegangan atau arus berlebih. Misalnya, fuse, relay proteksi, dan circuit breaker dipasang untuk memutuskan rangkaian jika terjadi gangguan. Proses ini memastikan tegangan yang disuplai selalu aman dan stabil selama operasional kereta, sehingga efisiensi dan keandalan sistem kelistrikan kereta dapat terjaga dengan baik.



Gambar 3.3 Single Line Diagram Kereta Rel Listrik

3.5 Mengatur Rolling Stock dalam Software Etrax

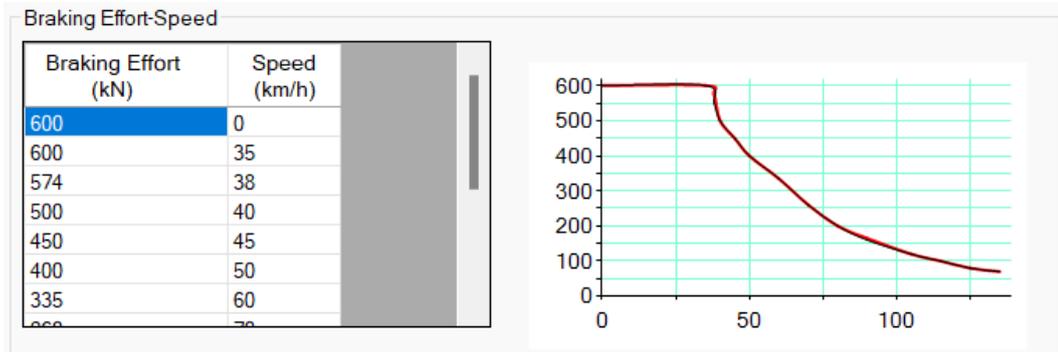
Tractive Effort mengacu pada gaya yang diperlukan untuk mempercepat kereta. Pada awalnya, Tractive Effort yang tinggi diperlukan untuk mengatasi hambatan dan mendorong kereta maju. Pada kecepatan 0-35 km/jam membutuhkan gaya tractive effort sebesar 574kN yang bertujuan untuk memperoleh nilai akselerasi kereta pada awal pemberangkatan mencapai 0,82m/s². Setelah kereta mencapai nilai akselerasi 0,82 m/s², kecepatan kereta meningkat dan Tractive Effort yang diperlukan berkurang karena dibutuhkan lebih sedikit gaya untuk mempertahankan kecepatan daripada untuk mempercepat.



Gambar 3.4 Kurva Tractive Effort pada Kereta

Di sisi lain, upaya pengereman mengacu pada gaya yang diperlukan untuk memperlambat atau menghentikan kereta. Kurva upaya pengereman dimulai dari nol saat kereta diam, dan secara bertahap meningkat saat kecepatan kereta meningkat. Kurva mencapai puncaknya pada 35 km/jam dengan nilai braking effort mencapai 600kN, yang merupakan upaya pengereman maksimum yang dapat diterapkan tanpa menyebabkan roda terkunci dan kehilangan traksi. Di atas 120

km/jam, upaya pengereman secara bertahap berkurang karena berkurangnya efektivitas rem pada kecepatan yang lebih tinggi. *Tractive Effort* dan *Braking Effort* kecepatan kereta yang terisi penuh.



Gambar 3.5 Kurva Braking Effort pada Kereta

Berikut ini merupakan tabel 3.4 yang memberikan rincian tentang armada kereta api yang digunakan dalam model simulasi.

Tabel 3.1 Spesifikasi Rolling Stock dalam Software Etrax

Parameter	Konfigurasi
Panjang kereta setiap gerbong (m)	20
Berat kereta (ton)	658
Lebar badan kereta (m)	3
Tinggi atap kereta dari kepala rel maksimum (m)	3,985
Panjang total kereta (m)	240
Acceleration limit (m/s ²)	0,82
Deceleration limit (m/s ²)	1
Dwell time (s)	30
Headway time (s)	90
Number of Axles	12 (M-T-T-M)

M = Motor Car
T = Trailer Car

Total berat KRL dihitung berdasarkan berat kosong kereta ditambah dengan berat penumpang dengan kapasitas 200% dan asumsi rata - rata berat penumpang 75 kg/orang. Konsumsi daya dan arus KRL dihitung berdasarkan jumlah motor

traksi dikali dengan daya traksi/motor kemudian dijumlahkan dengan daya auxiliary. Total arus didapat dari total daya dibagi dengan tegangan kerja yaitu 1500 VDC.

Dwell Time adalah periode waktu yang diukur dari ketika kereta tiba di stasiun hingga ketika kereta meninggalkan stasiun. Ini termasuk waktu yang dibutuhkan untuk melakukan operasi bongkar muat penumpang dan barang, serta waktu tunggu yang mungkin diperlukan jika kereta tidak dapat langsung melanjutkan perjalanan.

Headway time adalah interval waktu yang diukur dari saat bagian depan kereta pertama melewati suatu titik (misalnya, stasiun) hingga saat bagian depan kereta berikutnya melewati titik yang sama. Waktu ini biasanya diukur dalam satuan menit atau detik. Adapun fungsi dari headway time sebagai berikut:

- a. Pengaturan Jadwal: Headway time membantu dalam perencanaan dan pengaturan jadwal perjalanan kereta. Semakin pendek headway time, semakin sering kereta dapat beroperasi pada rute yang sama.
- b. Kapasitas Jalur: Headway time berpengaruh pada kapasitas jalur kereta. Dengan headway yang lebih pendek, lebih banyak kereta dapat melayani rute dalam periode waktu tertentu.
- c. Pengalaman Penumpang: Headway time yang lebih pendek biasanya berarti waktu tunggu yang lebih singkat bagi penumpang, meningkatkan kenyamanan dan kepuasan pengguna layanan transportasi.