

BAB II

LANDASAN TEORI

1.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penelitian skripsi ini yang berjudul “Analisis Pengaruh Kecepatan Terhadap Konsumsi Daya Listrik pada Kereta Rel Listrik (KRL) Menggunakan diperlukan dukungan dari hasil penelitian yang telah ada sebelumnya.

Dalam jurnal mengenai [12]. Penelitian ini menganalisis konsumsi daya listrik pada kereta penumpang kelas eksekutif Argo Cirebon, khususnya untuk mengetahui konsumsi daya total serta kapasitas tambahan gerbong yang bisa ditampung oleh genset kereta pembangkit. Penelitian dilakukan dengan mengukur beban listrik pada gerbong, kapasitas genset, dan jumlah maksimum gerbong yang bisa ditambahkan, baik saat kereta berada di depo maupun selama perjalanan Gambir-Cirebon (PP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa saat berada di depo, konsumsi daya lebih rendah dibandingkan ketika kereta dalam perjalanan. Beban maksimum yang terukur selama perjalanan mencapai 177 KW, dengan rata-rata arus sebesar 35 A, sementara di depo hanya sebesar 156 KW dengan arus maksimum 280 A. Kapasitas genset yang digunakan mencapai 36,70% di depo dan 45,38% selama perjalanan. Daya aktif meningkat setelah perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor, dari $\cos \phi$ 0,78 menjadi 0,98, yang meningkatkan efisiensi penggunaan daya. Daya yang digunakan oleh kereta Argo Cirebon selama perjalanan lebih tinggi dibandingkan di depo, dan terdapat penurunan tegangan di gerbong yang lebih jauh dari genset. Perbaikan faktor daya diperlukan untuk meningkatkan efisiensi energi, terutama saat menambah gerbong untuk menghindari penurunan tegangan yang besar.

Sedangkan pada penelitian [13]. Artikel ini mengkaji optimasi konsumsi energi untuk kereta api berkecepatan tinggi menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Dengan fokus pada strategi kontrol operasi kereta, artikel ini memperkenalkan model matematika baru yang mempertimbangkan konsumsi energi terhadap jarak dan kecepatan, waktu perjalanan, dan akurasi pemberhentian.

Dengan menetapkan batas kecepatan dan kondisi gerak sebagai batasan, algoritma ini dioptimalkan untuk mengurangi konsumsi energi tanpa mengorbankan performa operasional. Simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa dengan menggunakan PSO, konsumsi energi berkurang sekitar 2% dibandingkan dengan metode sebelumnya. Algoritma ini berhasil mengidentifikasi strategi kontrol yang optimal, seperti pengaturan daya traksi maksimum diikuti oleh operasi meluncur dan pengereman maksimum pada fase akhir, yang terbukti menghemat energi. Sistem simulasi yang dibangun mampu menggambarkan proses konsumsi energi secara dinamis dan memudahkan dalam merancang ulang karakteristik operasional kereta untuk penghematan energi.

Berdasarkan penelitian yang sudah ada kedua jurnal memiliki fokus utama yang berbeda meskipun sama-sama membahas konsumsi energi pada transportasi kereta. (tentang kereta Argo Cirebon) berfokus pada konsumsi daya listrik pada kereta penumpang kelas eksekutif Argo Cirebon. Penelitian ini mengukur kapasitas genset, konsumsi daya gerbong, serta mencari jumlah gerbong tambahan yang dapat ditampung berdasarkan kapasitas genset saat kereta berada di depo dan selama perjalanan. Jurnal kedua (tentang kereta berkecepatan tinggi) berfokus pada optimasi konsumsi energi kereta berkecepatan tinggi menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Penelitian ini bertujuan untuk menemukan strategi kontrol optimal untuk mengurangi konsumsi energi dengan memanfaatkan algoritma PSO, serta menyimulasikan operasi kereta berkecepatan tinggi untuk meningkatkan efisiensi energi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa meskipun keduanya berfokus pada efisiensi energi kereta, pendekatan dan teknologi yang digunakan sangat berbeda sesuai dengan konteks dan jenis kereta yang diteliti.

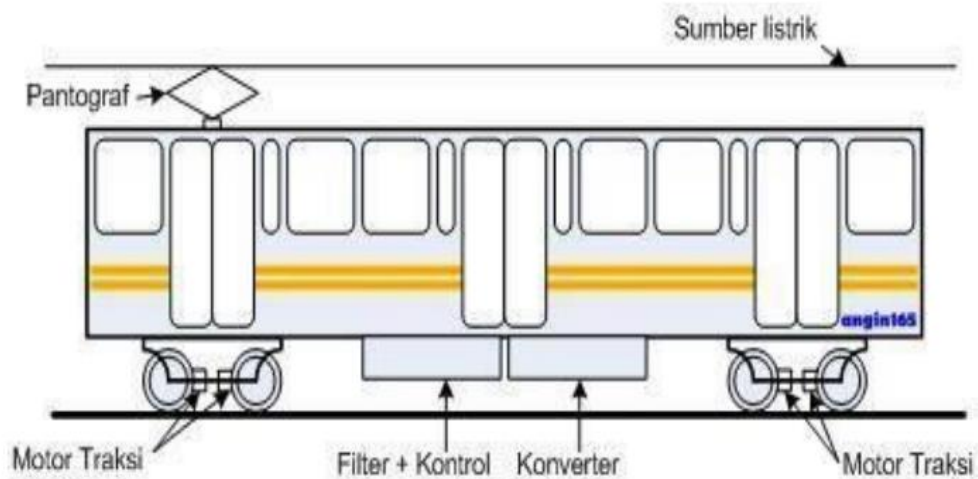
1.2 KRL (Kereta Rel Listrik)

Kereta rel listrik adalah sebutan bagi kereta ramah lingkungan yang sumber energinya memanfaatkan listrik. Pada KRL, daya listrik disuplai dengan menggunakan kawat konduktor dan diatur serta dikendalikan dengan gardu taksi pada keseluruhan lintasan kereta rel listrik yang dikenal dengan *catenary system* atau listrik aliran atas. Selain ramah lingkungan, KRL memiliki keistimewaan dibandingkan kereta diesel biasa (KRDE) yaitu dapat membawa penumpang

dengan kapasitas banyak, harga ekonomis, dan ditiadakannya sistem antri untuk membeli tiket.

Pada pengoperasian kereta rel listrik, tidak membutuhkan lokomotif penarik untuk menggerakannya dan bersifat mandiri karena memiliki penggerak sendiri berupa motor traksi yang dipasangkan di masing-masing porosnya melalui gear box pada kereta mobil bermotor (MC) dengan memakai tenaga listrik. Kereta rel listrik bergerak berdasarkan sistem elektifikasi yang memasok energi listrik pada lokomotif kereta api dan beberapa unit gerbong lainnya. Untuk mendistribusikan sumber listrik ke KRL maka dipergunakan alat pantograf untuk mengalirkan listrik KRL ke konverter yang terhubung dengan motor traksi yang membuat KRL dapat bergerak. Kereta rel listrik memakai tegangan kerjanya sebesar 1500 VDC dengan suplai dari PLN sebesar 20 KVA yang kemudian melalui berbagai tahapan hingga sampai pada tegangan kerja DC. Karena KRL mengangkut penumpang yang memiliki tenaga penggerak tersendiri, maka penataan peralatan kereta harus memiliki bagian seperti:

1. Rangka dasar dan badan
2. Fasilitas untuk pelayanan penumpang
3. Perangkat penggerak
4. Perlengkapan kontrol
5. Perangkat perangkai
6. Peralatan keselamatan dan keamanan operasi kereta api.



Gambar 2.1 Kereta Rel Listrik

(source: <https://museumlistrikpln.com/v2/id/kereta-listrik/>)

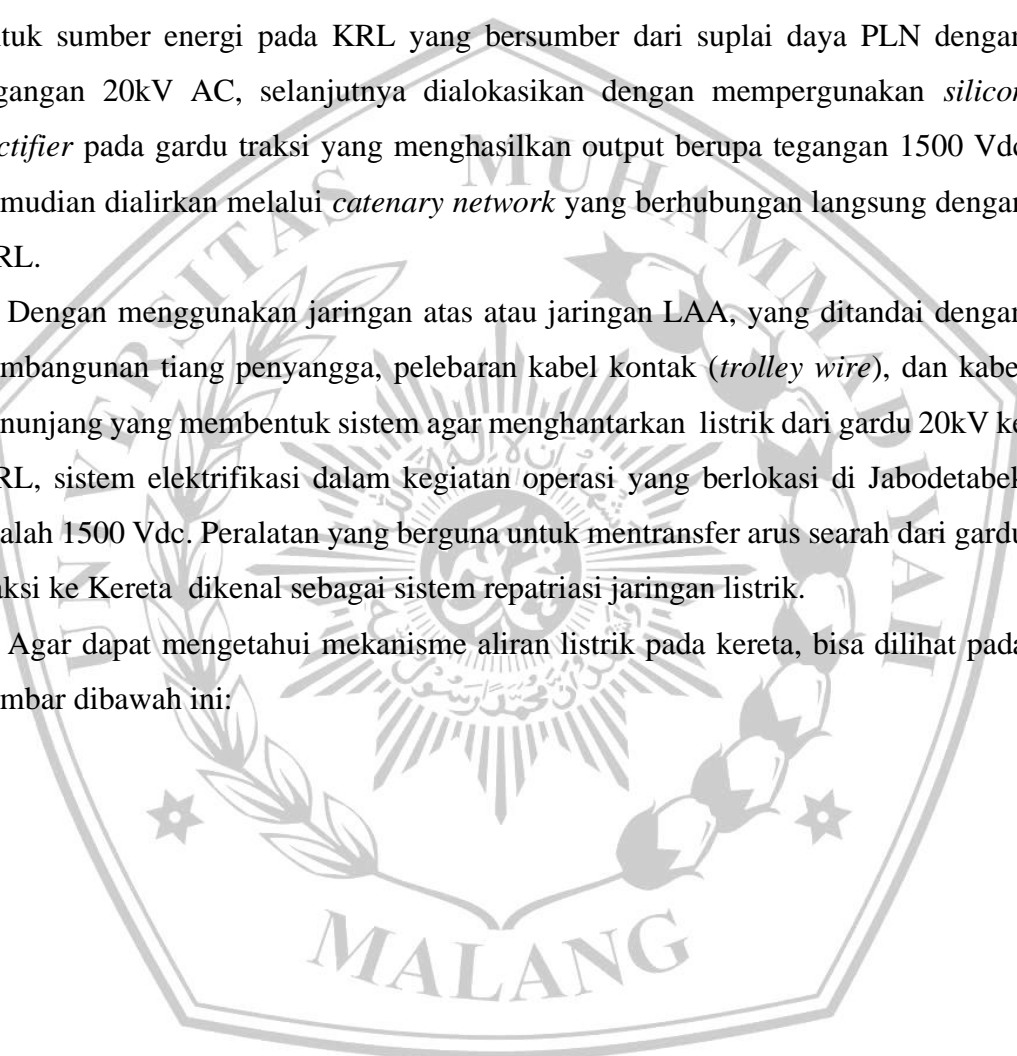
1.3 Listrik Aliran Atas (LAA)

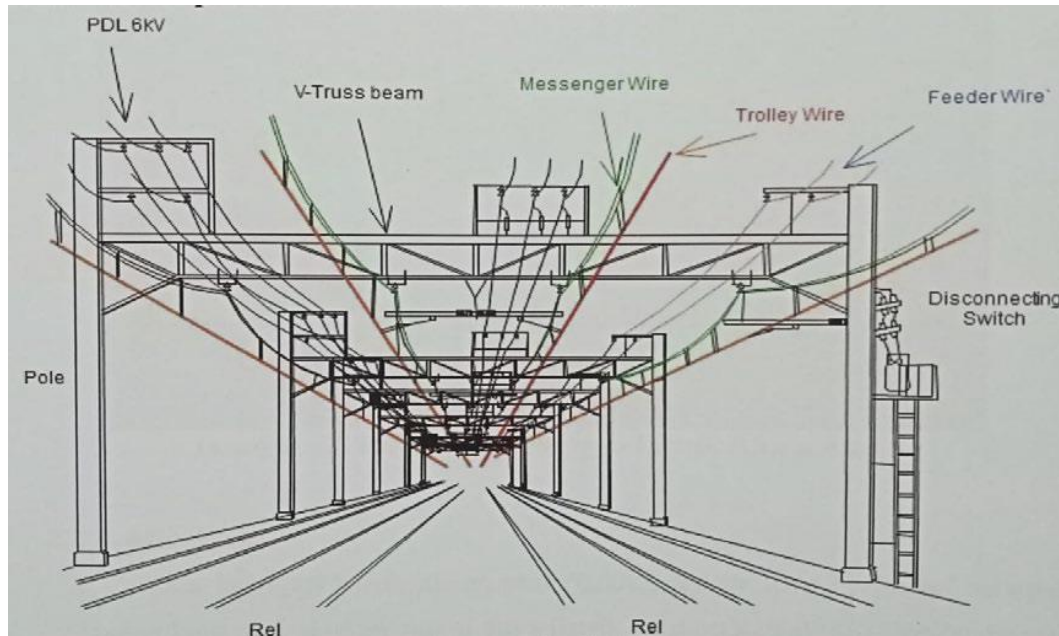
Listrik Aliran Atas atau LAA didefinisikan sebagai suatu sistem yang bagiannya terdapat gardu traksi dan jaringan katenari yang berperan untuk mendistribusikan energi dari sumber ke beban, sehingga KRL dapat melaju. Adapun yang dimaksud dengan beban yaitu Kereta Rel Listrik (KRL) [11].

Gardu traksi bermanfaat untuk menyuplai daya dengan tegangan 1500 Vdc untuk sumber energi pada KRL yang bersumber dari suplai daya PLN dengan tegangan 20kV AC, selanjutnya dialokasikan dengan mempergunakan *silicon rectifier* pada gardu traksi yang menghasilkan output berupa tegangan 1500 Vdc kemudian dialirkan melalui *catenary network* yang berhubungan langsung dengan KRL.

Dengan menggunakan jaringan atas atau jaringan LAA, yang ditandai dengan pembangunan tiang penyangga, pelebaran kabel kontak (*trolley wire*), dan kabel penunjang yang membentuk sistem agar menghantarkan listrik dari gardu 20kV ke KRL, sistem elektrifikasi dalam kegiatan operasi yang berlokasi di Jabodetabek adalah 1500 Vdc. Peralatan yang berguna untuk mentransfer arus searah dari gardu traksi ke Kereta dikenal sebagai sistem repatriasi jaringan listrik.

Agar dapat mengetahui mekanisme aliran listrik pada kereta, bisa dilihat pada gambar dibawah ini:





Gambar 2.2 Proses Daya Listrik KRL

(source: <https://unsada.e-journal.id/jst/article/view/58/45>)

Berikut ini merupakan penjelasan mengenai gambar 2.2 tentang proses daya listrik KRL:

1. *Messenger wire*

Di jaringan listrik atas (LAA), tugas *messenger wire* adalah menopang berat bahan lain termasuk kawat troli. Sistem untuk kawat messenger dapat digunakan, yang terdiri dari troli tunggal dengan tipe ujung lurus yang memiliki luas penampang 90 mm^2 dan gaya tarik 100 N.

2. *Feeder wire*

Ada dua sistem untuk *feeder wire* diantaranya troli tunggal dan troli ganda. Kawat tembaga dengan tegangan tarik 1200 N dan luas penampang 300 mm^2 diperlukan untuk satu troli. Ada dua persyaratan untuk troli ganda.

3. *Trolley Wire*

Dalam menghubungkan ke pantograf pada kereta rel listrik, kawat troli (*trolley wire*) berfungsi sebagai konduktor listrik. Ada dua jenis sistem kawat troli yang pertama troli tunggal dan yang kedua troli ganda.

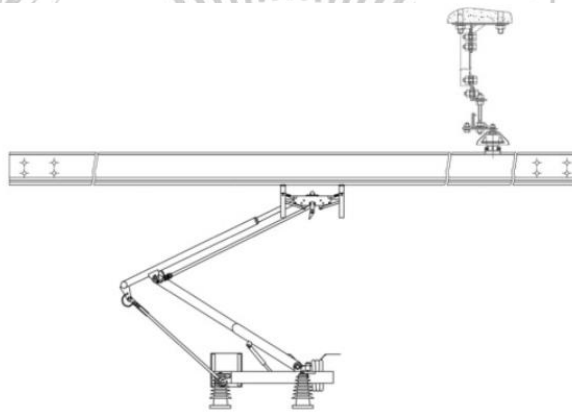
4. *Hanger Wire*

Hanger wire berfungsi sebagai menggantungkan kawat troli dan menjaga agar posisi sejajar dengan kawat trolley.

1.4 Pantograf

Pantograf merupakan salah satu bagian inti pada kereta, karena pantograf memiliki tugas sebagai koneksi di antara kabel tembaga dengan tegangan 1500 VDC menuju pada traksi motor kereta. Bagian pantograf yang terhubung langsung dengan LAA yaitu dinamakan *main contact strip* [6].

Pada alat transportasi masal, kenyamanan dan keamanan ini adalah suatu kewajiban khususnya pada kereta rel listrik. Sehingga diperlukannya sistem kelistrikan KRL yang mengandung beberapa pantograph. Adapun fungsi dari Pantograph sebagai pemasok daya motor traksi dan motor kompresor pada seluruh sistem pada KRL. Pantograph tersebut memerlukan catu daya agar dapat beroperasi secara optimal yang didapatkan dari catenary yang bersumber dari PLN dengan cara pantograf harus bergerak keatas. Sistem kendali pantograf bisa dioperasikan secara otomatis atau biasa dikenal Sistem Kendali Pantograph Normal Mode maupun manual.



Gambar 2.3 Skema Kontak Pantograf dengan Listrik Aliran Atas (LAA)

(source: Bautista,dkk/Railway Enthusiast Digest)

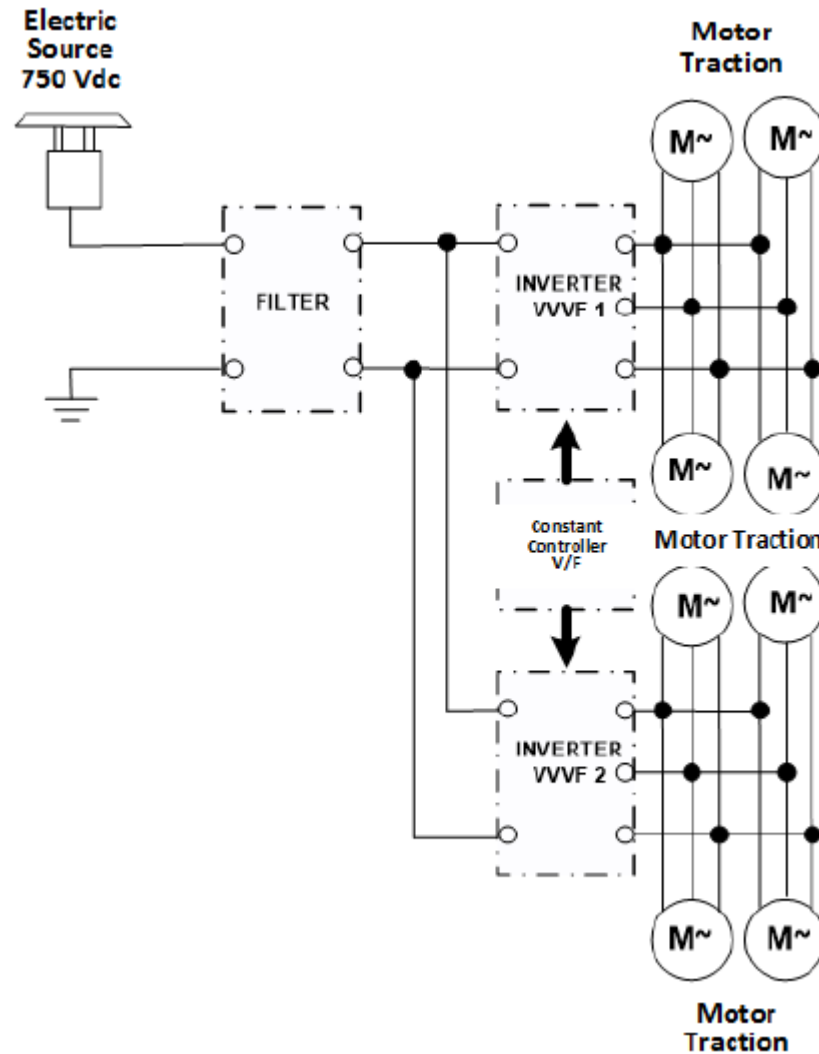
Berikut ini penjelasan dari fungsi utama yang ada pada pantograf dalam kereta yaitu:

1. Penyuplai Daya Listrik: Pantograf berguna sebagai perantara pada kawat overhead yang membawa arus listrik (biasanya 1500 VDC atau 25 kVAC) dengan sistem kelistrikan kereta, termasuk motor traksi, motor kompresor, serta sistem penerangan. Dengan cara ini, pantograf memastikan bahwa kereta dapat beroperasi dengan efektif dan aman.

2. Menjaga Kontak Stabil: Untuk menghindari terputusnya aliran listrik yang dapat mengganggu jalannya kereta yang bergerak dengan kecepatan tinggi, maka dibuatlah pantograf agar dapat mempertahankan kontak yang konsisten dengan kawat trolley.
3. Penyesuaian Ketinggian: Pantograf mempunyai proses yang memungkinkan penyesuaian ketinggian secara otomatis maupun manual, sehingga dapat berfungsi dengan baik meskipun ada variasi dalam ketinggian kawat overhead akibat perubahan kondisi lingkungan seperti cuaca atau konstruksi.
4. Regenerasi Energi: Pada beberapa sistem, pantograf juga dapat bertugas dalam proses regenerasi energi, di mana energi kinetik kereta saat melambat dapat dikonversi kembali menjadi energi listrik dan disalurkan kembali ke jaringan listrik.

1.5 Variable Voltage Variable Frequency (VVVF)

Sistem inverter dengan tegangan variabel frekuensi variabel (VVVF) digunakan untuk penggerak gerbong kereta api listrik dan sangat penting untuk mengurangi kebisingan elektromagnetik yang ditimbulkan oleh sistem inverter tersebut. Standar internasional IEC mengatur ketentuan VVVF dalam kereta api listrik, yang mewajibkan produsen yang membuat VVVF untuk memenuhi standar yang telah ditetapkan [2].



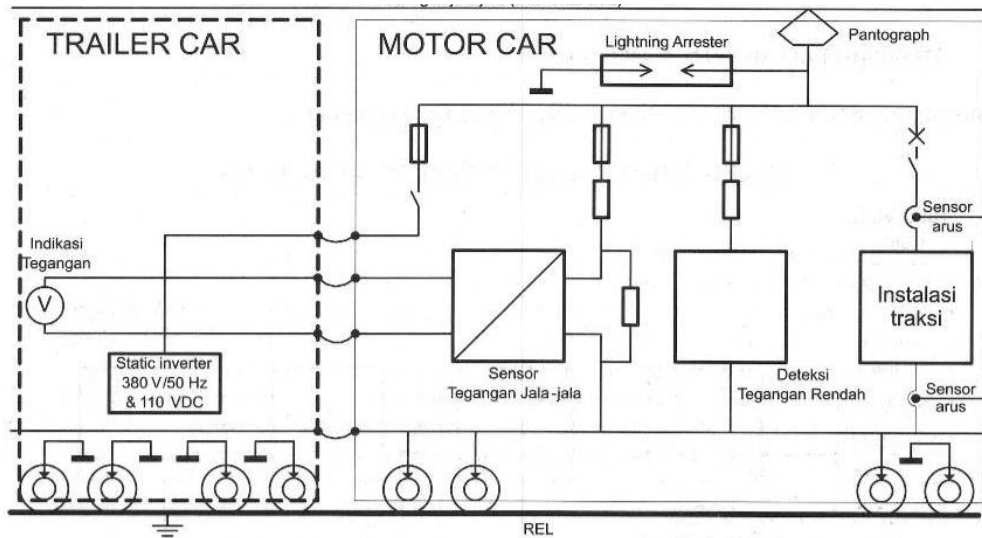
Gambar 2.4 Sistem Propulsi LRT

(source: <https://www.keretalistrik.com/2016/07/>)

1.6 Static Inverter Voltage (SIV)

Sistem inverter statis (SIV) pada KRL mengganti daya masuk nilai 1.500 Vdc dan diubah menjadi daya keluaran 380 Vac dan 110 Vdc. SIV berguna untuk menyuplai sistem kelistrikan seperti kompresor, ventilasi, lampu penerangan, kontrol drive/pengereman, dll. Konsumsi daya listrik yang diberikan oleh SIV dapat berhenti beraktivitas ketika keadaan darurat. Jumlah kerusakan SIV pada KRL Holec-BN tergolong tinggi. Untuk menjaga keamanan KRL pada level yang sesuai, maka diperlukan perbaikan untuk mencegah kerusakan pada sistem. Diperlukan tingkat keandalan yang tinggi untuk memastikan ketersediaan KRL yang optimal,

agar dapat terpenuhinya keinginan masyarakat pengguna jasa dalam mendapatkan layanan transportasi kereta api dengan puas [7].



Gambar 2.5 Skema Distribusi Tegangan dari LAA ke Static Inverter Statis (SIV)

(<https://www.keretalistrik.com/2016/07/>)

SIV pada kereta rel listrik yaitu sebagai auxiliary. Penggunaan kelistrikan yang disuplai oleh SIV :

1. Kompresor
2. Courtesy Light
3. Kontrol Pintu
4. Bel pintu
5. Kunci pintu
6. Lampu penerangan kabin
7. Instalasi pengereman

Berikut deskripsi dari berbagai penggunaan daya listrik yang dipasang oleh SIV yaitu:

- a. Kompresor

Membutuhkan pasokan udara untuk mengoperasikan pengepres rem pneumatik maupun membuka/menutup pintu Kereta harus diproduksi oleh kompresor. Satu kendaraan trailer KRL memiliki kompresor tunggal yang dipasang di atasnya yang ditenagai oleh motor induksi yang menggunakan catu daya 380 V pada daya motor.

- b. Ventilasi

Ada dua jenis ventilasi: ventilasi pada instalasi traksi dan ventilasi di kabin atau di dalam kereta. Pendinginan dicapai melalui ventilasi sendiri atau menekan, tergantung pada bagaimana inverter traksi dan motor dirancang. Inverter traksi memiliki mekanisme pendinginan internalnya sendiri untuk menjaga dirinya tetap dingin. Kipas menyediakan pendinginan untuk rumah inverter. Motor yang menerima listrik dari sumber daya 220/380 VAC memberi daya pada kipas. Sekitar 10 kW daya diperlukan untuk ventilasi.

c. Lampu Penerangan

Ada berbagai jenis sistem pencahayaan, termasuk lampu heck, penerangan depan, penerangan di dalam kabin untuk pengemudi, dan penerangan di dalam kereta untuk penumpang. Sistem pencahayaan tidak termasuk dalam paket. Dalam keadaan darurat, pencahayaan bagian dalam untuk pengemudi dan penumpang-mungkin tidak berfungsi dengan baik karena baterai mati. Sumber daya utama untuk penerangan adalah catu daya 220/380 Vac. Penerangan samping dan depan juga bertenaga baterai untuk alasan keamanan. Pencahayaan depan dan samping hanya menggunakan daya yang sederhana.

d. Suara Sistem Pengeras

Untuk pengeras suara biasanya memerlukan catu daya 24 Vdc untuk berfungsi. Jika salah satu sumber daya ini tidak tersedia, Anda masih dapat menyalakan sistem *loudspeaker* dengan membuat menggunakan tegangan 110 Vdc atau 220/380 Vac Anda sendiri. Apabila pengeras suara diperlukan, baterai disiapkan untuk memberi daya pada perangkat.

e. Kontrol Kelistrikan

Hasil dari variasi sistem kontrol, termasuk pantograf, drive/braket, pintu otomatis, dan kontrol lainnya. Jika sumber listrik tambahan rusak atau berhenti, baterai akan memberikan daya yang diperlukan. Catu daya tambahan tidak digunakan untuk memberi daya pada setiap sistem kontrol. Beberapa subsistem memiliki pasokan sistem kontrol elektronik internal mereka sendiri.

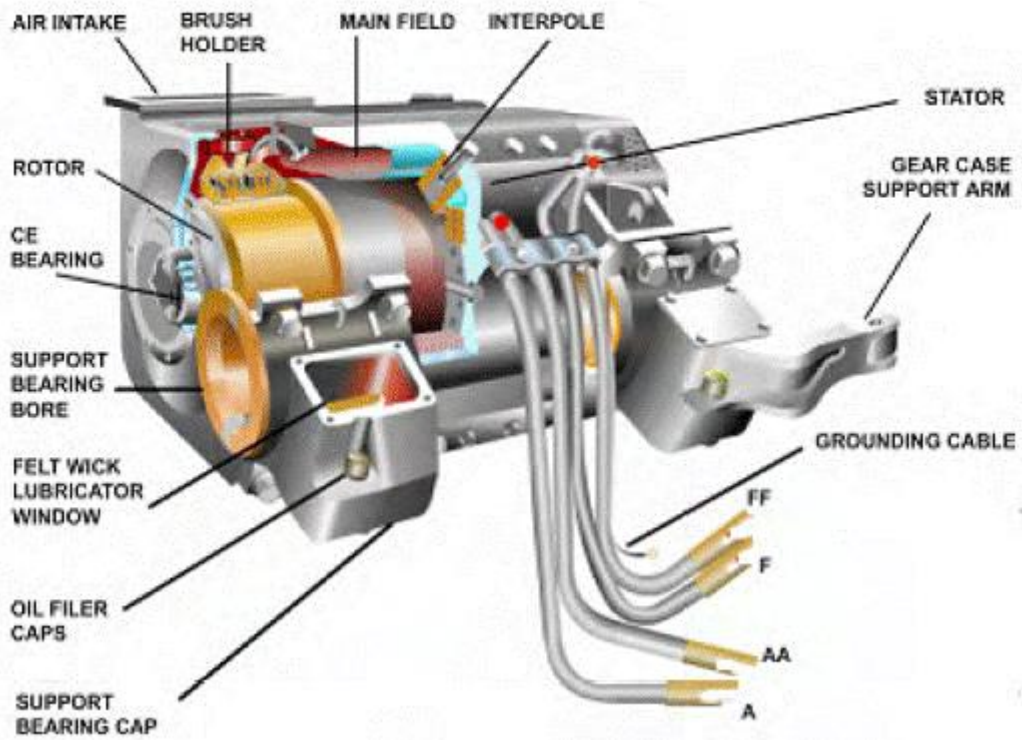
1.7 Tractive Effort

Tractive effort adalah istilah yang dipergunakan dalam teknik kereta api untuk menggambarkan daya tarik yang diperlukan untuk menggerakkan kereta api. Dalam kereta api, *tractive effort* sangat penting untuk menentukan dan memastikan kemampuan gerak kereta api dapat bergerak dengan aman dan efisien.

Tractive effort didefinisikan sebagai gaya pada pelek atau tepi luar roda penggerak kereta api yang bergerak. Dengan kata lain, ini adalah total dari gaya traksi dan gaya gelinding pada permukaan jalan. Pada kereta api jalur utama, gaya traksi disebabkan oleh lokomotif dan pada kereta pinggiran kota disebabkan oleh gerbong motor. Gaya tarik merupakan gaya horizontal yang tersedia bagi kendaraan untuk menarik beban. Gaya ini lebih kecil dari gaya traksi yang diperlukan untuk mengoperasikan lokomotif. Upaya traksi maksimum yang diijinkan adalah yang dapat diterapkan tanpa selip roda [5].

2.7 Motor Taksi

Karena motor traksi tipe AC adalah jenis yang paling umum digunakan dalam KRL, tegangan harus terlebih dahulu diubah menjadi AC menggunakan inverter sebelum motor traksi dapat digunakan. Kecepatan motor traksi dikendalikan dengan menyesuaikan tegangan dan frekuensi melalui penggunaan inverter jenis VVVF (Variable Voltage Variable Frequency). Biasanya, satu mobil sepeda motor memiliki empat motor traksi. Tegangan 1500 VDC disuplai tidak hanya ke motor traksi tetapi juga ke sistem tenaga tambahan. Tegangan 380 V disuplai oleh sistem bantu untuk menggerakkan motor kompresor, unit AC, lampu, dan sistem kontrol kereta. SIV (Static Inverter) menggunakan sistem konverter tegangan yang mengubah 1500 Vdc menjadi 380 Vac.



Gambar 2.6 Traksi Motor D-29

(source: <https://citra-teknologi.blogspot.com/2015/01/pemeliharaan-traksi-motor.html>)

