

**STUDI PERBANDINGAN SISTEM PENGENDALI MOTOR
TRAKSI PADA KERETA REL LISTRIK (KRL) DI
INDONESIA UNTUK JALUR REL SURABAYA - MALANG**

SKRIPSI

*Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik*



**Disusun Oleh:
Aditya Budiman
NIM. 0210630006**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN ELEKTRO**

2007

**STUDI PERBANDINGAN SISTEM PENGENDALI MOTOR
TRAKSI PADA KERETA REL LISTRIK (KRL) DI
INDONESIA UNTUK JALUR REL SURABAYA - MALANG**

SKRIPSI

*Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik*



**Disusun Oleh:
Aditya Budiman
NIM. 0210630006**

**Mengetahui dan menyetujui,
Dosen Pembimbing**

Ir. Soeprapto, MT
NIP. 131 837 968

Ir. Sutrisno
NIP. 131 653 479

**STUDI PERBANDINGAN SISTEM PENGENDALI MOTOR
TRAKSI PADA KERETA REL LISTRIK (KRL) DI
INDONESIA UNTUK JALUR REL SURABAYA - MALANG**

Disusun Oleh:

Aditya Budiman

NIM. 0210630006

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada

Tanggal 13 Juli 2007

DOSEN PENGUJI

Ir. Hari Santoso, MS

NIP. 131 470 477

Dr. Ir. Harry Soekotjo Dachlan, M.Sc

NIP 131 586 562

Ir. H. Choiri

NIP. 130 703 042

Ir. Hery Purnomo

NIP. 131 131 027

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom

NIP. 131 879 033

PENGANTAR

Segala puji hanya bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya kepada penulis sehingga penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan. Hanya karena pertolongan-Nya semata penulis mampu melewati segala kendala yang ada selama penyusunan skripsi ini. Semoga sholawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat dan para pengikut beliau sampai hari akhir.

Skripsi berjudul **“Studi Perbandingan Sistem Pengendali Motor Traksi Pada Kereta Rel Listrik (KRL) di Indonesia Untuk Jalur Rel Surabaya-Malang”** ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan terima kasih kepada:

- Ayah-ku, Almarhumah Ibunda-ku, Kakak-ku dan Adik Linda yang aku cintai yang telah memberikan inspirasi, motivasi dan semangat pantang menyerah hingga terselesaikannya skripsi ini,
- Bapak Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro dan Bapak Rudy Yuwono, ST, M.Sc. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan bantuan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
- Bapak Ir. Choiri selaku KKDK Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang,
- Bapak Ir. Soeprpto, MT dan Bapak Ir. Sutrisno selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan ide, bimbingan, motivasi, pengarahan serta saran dalam penyusunan skripsi ini,
- Bapak/Ibu Dosen Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan serta seluruh karyawan Jurusan Teknik Elektro yang telah membantu dalam pengurusan administrasi dan bantuan lainnya,
- PT. KAI Unit Balai Yasa Manggarai Jakarta, khususnya kepada Bapak Sumarno dan Bapak Ir. Soegito atas ide, informasi serta bimbingannya dalam penyusunan skripsi ini.

- PT KAI Unit SK 85 Distrik Jalan Rel Daop VIII Surabaya, khususnya kepada Bapak Darsono dan Bapak Nyoto atas ide, informasi, serta bimbingannya dalam penyusunan skripsi ini.
- Teman-teman di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan dukungan dan semangat sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penyusun menyadari bahwa yang tersusun dalam skripsi ini masih banyak kekurangan-kekurangan dan jauh dari sempurna, hal ini tidak lain karena keterbatasan materi dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Karena itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan penyusunan skripsi ini.

Akhir kata, penulis mengharapkan semoga yang terdapat dalam skripsi ini, dapat bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa khususnya dan bagi seluruh pembaca pada umumnya.

Malang, Juli 2007

Penulis



2.5.1	Nilai Dari F_a	28
2.5.2	Nilai Dari F_r	28
2.5.3	Nilai Dari F_g	29
2.5.4	Nilai Dari F_c	29
2.5.5	Mekanisme Pergerakan Kereta	30
BAB III METODOLOGI		31
3.1	Studi Literatur	31
3.2	Data	31
3.3	Analisis Data	32
3.4	Kesimpulan	32
BAB IV PEMBAHASAN		33
4.1	Kondisi Jalur Kereta Surabaya-Malang	33
4.2	Perhitungan Berat Total KRL	34
4.2.1	Perhitungan Berat Total KRL Rheostatik T6000	34
4.2.2	Perhitungan Berat Total KRL VVVF Holec BN	35
4.3	Perhitungan Kinerja Sistem Traksi	36
4.4	Analisis Sistem Kendali KRL Rheostatik T6000	37
4.4.1	Sub Periode Pengasutan	43
4.4.2	Sub Periode Percepatan	48
4.4.3	Sub Periode Meluncur	54
4.4.4	Sub Periode Perlambatan	54
4.5	Analisis Sistem Kendali KRL VVVF Holec BN	59
4.5.1	Unjuk Kerja Motor Traksi Dengan Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni	59
4.5.2	Unjuk Kerja Motor Traksi Dengan Menggunakan Catu Inverter Bermodulasi Lebar Pulsa	63
4.5.3	Sub Periode Pengasutan	67
4.5.4	Sub Periode Percepatan	70
4.5.5	Sub Periode Meluncur	74
4.5.6	Sub Periode Perlambatan	74
4.6	Hasil Perbandingan Kinerja Kereta Rel Listrik (KRL)	79



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	85
LAMPIRAN	86



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Kinerja Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Dalam Keadaan Berbeban Pada Sub Periode Pengasutan Dengan Hubungan Motor Traksi Seri dan Penguatan medan 100%	43
Tabel 4.2	Kinerja Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Dalam Keadaan Berbeban Pada Sub Periode Pengasutan Dengan Hubungan Motor Traksi Paralel dan Penguatan medan 100%	44
Tabel 4.3	Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Pengasutan.....	47
Tabel 4.4	Kinerja Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Dalam keadaan Berbeban Pada Sub Periode Percepatan Dengan Operasi Kendali <i>Weaken Field</i>	49
Tabel 4.5	Karakteristik Pengaturan Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Percepatan Dengan Operasi <i>Weaken Field</i> 35%	49
Tabel 4.6	Pengaruh Kemiringan Terhadap Kecepatan Maksimum KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Percepatan Dengan Kondisi Penguatan Medan 35%	52
Tabel 4.7	Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Percepatan Dengan Kondisi Penguatan Medan 35%	53
Tabel 4.8	Kinerja Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Dalam Keadaan Berbeban Pada Sub Periode Perlambatan	55
Tabel 4.9	Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Perlambatan.....	59
Tabel 4.10	Data Hasil Simulasi Unjuk Kerja Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni.....	62
Tabel 4.11	Perbandingan Tegangan dan Frekuensi Keluaran Dari <i>Inverter Module</i> KRL VVVF Holec BN.....	66
Tabel 4.12	Pengaruh Kemiringan Jalan rel terhadap Kinerja KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Pengasutan	70
Tabel 4.13	Karakteristik Pengaturan Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Percepatan.....	71

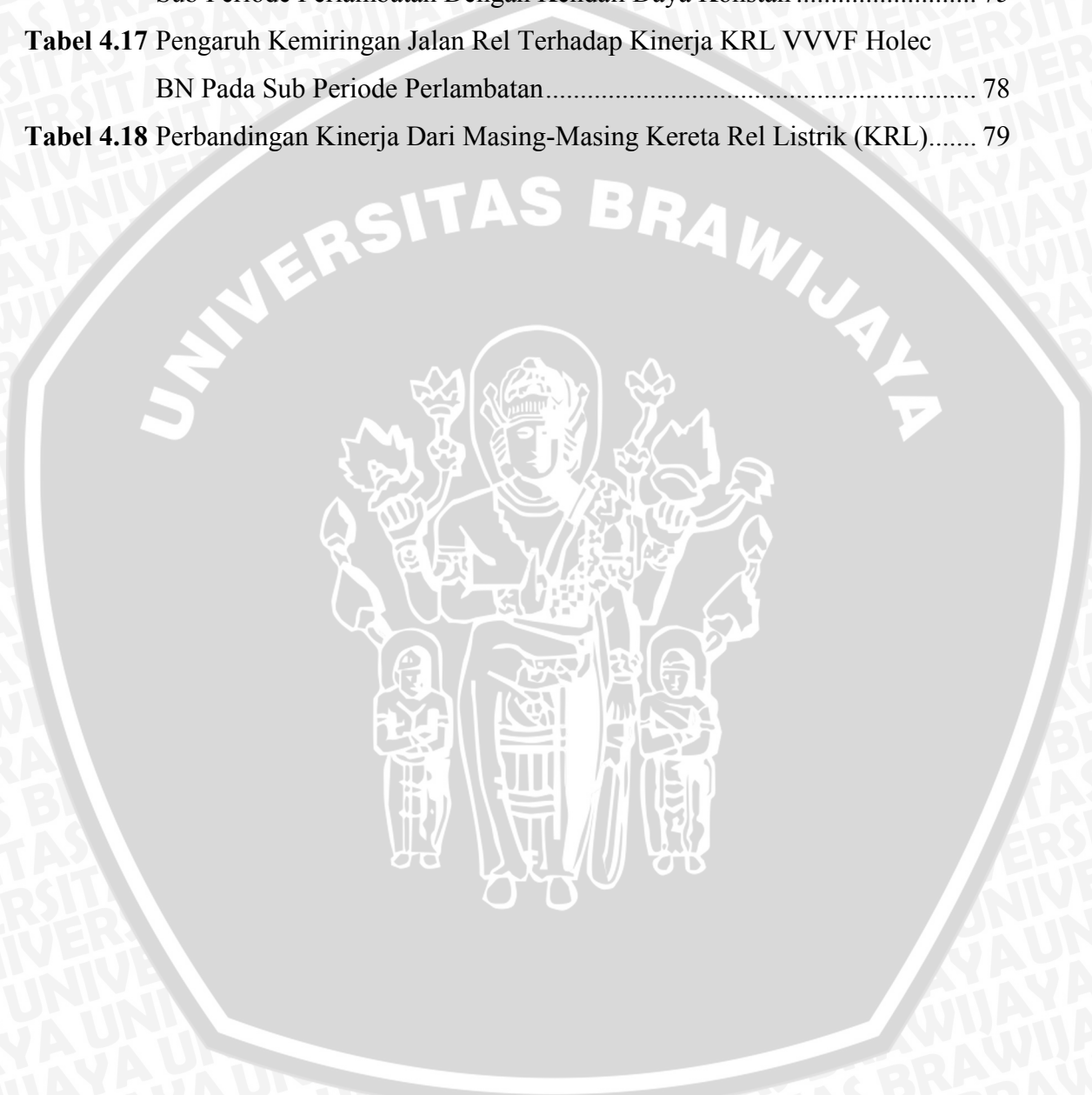
Tabel 4.14 Pengaruh Kemiringan Terhadap Kecepatan Maksimum KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Percepatan..... 73

Tabel 4.15 Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Percepatan 74

Tabel 4.16 Karakteristik Pengaturan Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Perlambatan Dengan Kendali Daya Konstan 75

Tabel 4.17 Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Perlambatan..... 78

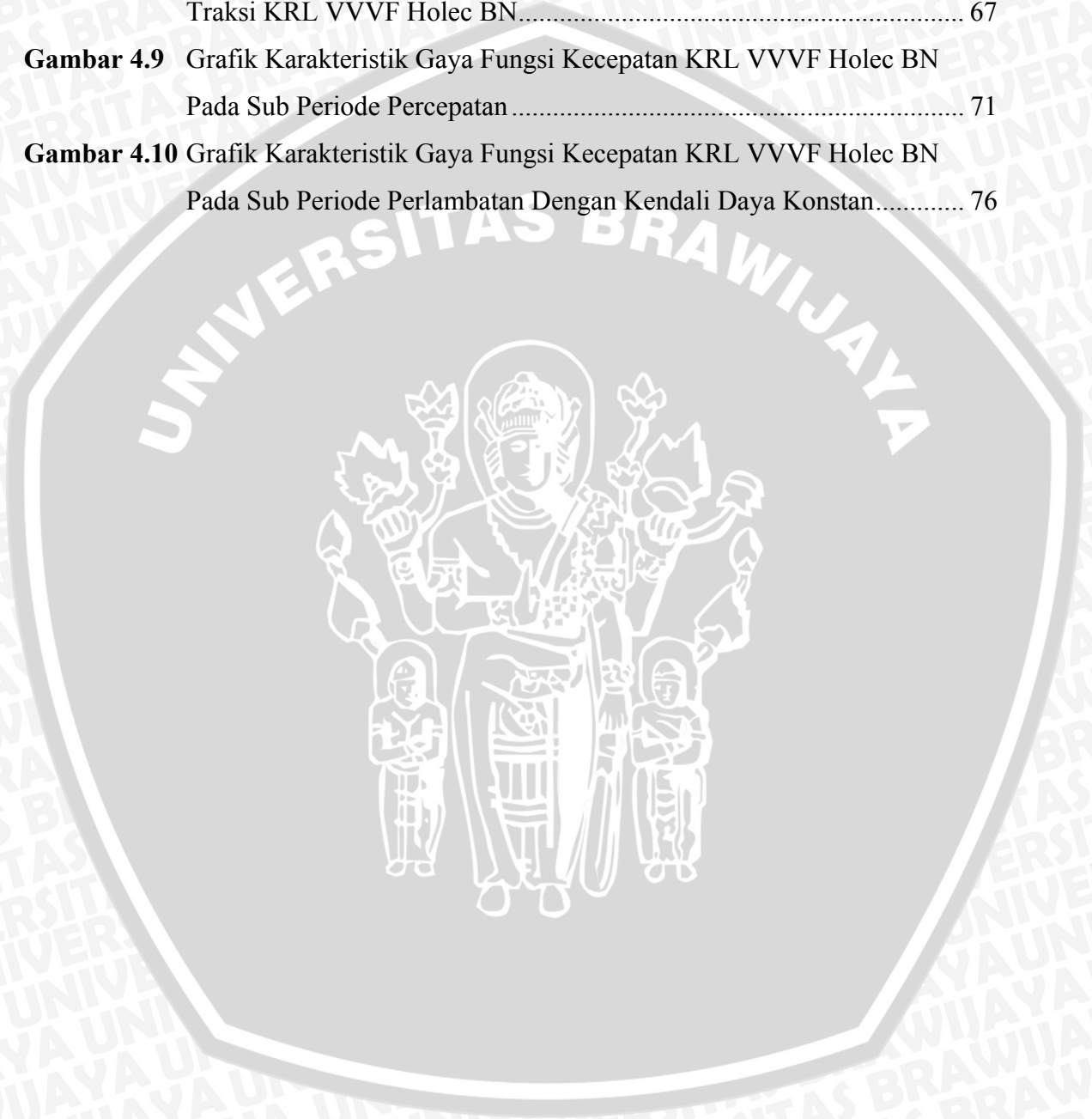
Tabel 4.18 Perbandingan Kinerja Dari Masing-Masing Kereta Rel Listrik (KRL)..... 79



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konfigurasi dasar KRL	6
Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Motor DC Seri	7
Gambar 2.3 Kurva Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Seri	8
Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Kecepatan-Arus Jangkar Motor DC Seri	9
Gambar 2.5 Rangkaian Sederhana Sistem Rheostatik	10
Gambar 2.6 Rangkaian Sederhana Pengereman Dinamik	12
Gambar 2.7 Motor Induksi Rotor Sangkar dan Rotor Belitan	14
Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi	16
Gambar 2.9 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi (Sisi Primer Sebagai Referensi).....	16
Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Rekomendasi IEEE	17
Gambar 2.11 Rangkaian Penyederhanaan Dengan Teorema Thevenin.....	17
Gambar 2.12 Grafik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Dengan Tegangan Stator Variabel	20
Gambar 2.13 Kurva Karakteristik Torsi Kecepatan.....	21
Gambar 2.14 Karakteristik Torsi Fungsi Putaran Diatas Nominal	25
Gambar 2.15 Penambahan Tegangan Untuk Menjaga Fluksi Magnetisasi Konstan....	26
Gambar 2.16 Kurva Karakteristik Torsi Kecepatan Dengan Kontrol VVVF	26
Gambar 2.17 Kurva Kecepatan Terhadap Waktu Dari Pergerakan Kereta Rel Listrik.....	27
Gambar 2.18 Gaya Gravitasi Benda Pada Bidang Miring.....	29
Gambar 2.19 Sistem Transmisi Roda Gigi	30
Gambar 4.1 Kurva Akselerasi KRL Rheostatik T6000	37
Gambar 4.2 Kurva Pengereman KRL Rheostatik T6000	38
Gambar 4.3 Grafik Karakteristik Torsi Fungsi Kecepatan KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Percepatan	50
Gambar 4.4 Grafik Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Dari Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni Pada Kondisi Beban Berubah-Ubah.....	61
Gambar 4.5 Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni Variabel dan Frekuensi Konstan 56 Hz.....	62

Gambar 4.6	Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Menggunakan Frekuensi Masukan Variabel dan Tegangan Masukan Konstan 1716 V.....	63
Gambar 4.7	Karakteristik Kontrol Tegangan dan Frekuensi KRL VVVF Holec BN.....	64
Gambar 4.8	Kurva Gaya-Kecepatan Pada Percepatan dan Pengereman Sistem Traksi KRL VVVF Holec BN.....	67
Gambar 4.9	Grafik Karakteristik Gaya Fungsi Kecepatan KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Percepatan.....	71
Gambar 4.10	Grafik Karakteristik Gaya Fungsi Kecepatan KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Perlambatan Dengan Kendali Daya Konstan.....	76



ABSTRAK

ADITYA BUDIMAN, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, 2007, *Studi Perbandingan Sistem Pengendali Motor Traksi Pada Kereta Rel Listrik (KRL) di Indonesia Untuk Jalur Rel Surabaya-Malang*, Dosen Pembimbing : Ir. Soeprpto, MT dan Ir. Sutrisno.

Kereta Rel Listrik (KRL) bagi masyarakat yang tinggal di kota besar merupakan salah satu solusi untuk menjawab masalah kemacetan lalu lintas dan polusi udara yang biasa terjadi akibat padatnya arus transportasi darat disana.

Dalam skripsi ini akan dibahas analisis perbandingan penggunaan Kereta Rel Listrik (KRL) dengan penggerak motor AC dan penggerak motor DC pada jalur kereta Surabaya-Malang sebagai bahan pertimbangan jenis KRL yang paling sesuai untuk dioperasikan disana, ditinjau dari sisi kinerja sistem traksi dalam menghasilkan gaya traksi yang dibutuhkan oleh KRL. Sistem pengendali motor traksi yang dipergunakan adalah sistem Rheostatik untuk KRL berpengerak motor DC dan sistem Variabel Voltage Variabel Frequency (VVVF) untuk KRL berpengerak motor AC. Dengan mengetahui kinerja masing-masing sistem yang direpresentasikan dalam kurva torsi fungsi kecepatan, maka akan diperoleh kinerja sistem berupa kecepatan maksimum yang mampu dicapai, waktu tempuh dan percepatan dari masing-masing jenis KRL untuk setiap periode perjalanannya pada kondisi beban yang berubah-ubah.

Dari hasil analisa data akan diketahui bahwa kedua jenis KRL layak untuk dioperasikan pada jalur kereta Malang-Surabaya dimana KRL Rheostatik T6000 unggul dari segi akselerasi dan KRL VVVF Holec BN unggul dari segi gaya traksi yang dihasilkan dan kecepatan maksimum yang mampu dicapai untuk kondisi beban yang berubah-ubah.

Kata kunci : kereta rel listrik (KRL), sistem rheostatik, sistem VVVF, motor traksi.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Apabila bercermin kepada Jakarta sebagai kota metropolitan terbesar di Indonesia, maka dapat dilihat betapa Kereta Rel Listrik (KRL) menjadi alat transportasi andalan bagi para pekerja yang berasal dari kota-kota satelit Jakarta seperti Bogor, Depok, Tangerang dan Bekasi (BODETABEK). Harga tiket yang murah dan waktu tempuh yang relatif cepat menjadi alasan mereka memilih KRL. Selain itu KRL pun bebas dari kemacetan lalu lintas dan lebih ramah lingkungan karena tidak adanya gas buang hasil pembakaran bahan bakar fosil.

Surabaya sebagai kota terbesar kedua di Indonesia setelah Jakarta, saat ini sudah berkembang menjadi pusat kegiatan industri dan perdagangan, sehingga setiap harinya ribuan orang datang untuk mencari nafkah disana. Malang, Sidoarjo dan kota-kota lain disekeliling Surabaya pun bukan tidak mungkin berkembang seperti halnya wilayah BODETABEK. Untuk itu dapat diusulkan pembangunan jaringan kereta rel listrik di wilayah Surabaya dan sekitarnya sebagai alternatif demi memudahkan masyarakat sekitar datang ke Surabaya.

Terlepas dari masalah pembangunan jaringan KRL, maka kiranya perlu diketahui kelayakan KRL untuk dioperasikan pada jalur kereta di sekitar Surabaya. Dengan melihat bahwa Malang adalah kota terbesar kedua di Jawa Timur dan jumlah penduduknya yang bekerja di Surabaya pun tergolong besar maka dapat diambil *sample* untuk studi kelayakan KRL pada jalur kereta Surabaya-Malang dengan panjang 92,797 km. Jalur kereta Surabaya-Malang dikenal sebagai jalur tanjakan yang cukup berat, naik dari ketinggian kota Surabaya 7 meter diatas permukaan laut (dpl) sampai dengan puncak tertinggi daerah antara Lawang-Singosari pada ketinggian 535 meter dpl menjadikan KRL yang akan dipergunakan harus memiliki motor traksi yang memiliki torsi awal yang tinggi, kemampuan pembebanan yang besar serta kemudahan dalam pengendalian kecepatannya.

Diasumsikan KRL yang akan dioperasikan adalah KRL yang sama dengan yang dipergunakan oleh PT Kereta Api Indonesia (KAI) Divisi Jabotabek. Saat ini KRL yang dioperasikan dapat digolongkan menjadi 2 jenis berdasarkan motor traksi yang

dipergunakan, yakni KRL berpengerak motor arus searah (DC) dan KRL berpengerak motor arus bolak-balik (AC).

KRL berpengerak motor DC merupakan kereta tertua yang dioperasikan oleh PT KAI, mulai beroperasi sejak tahun 1976. Terdapat 5 tipe KRL jenis ini di Indonesia yakni T115 dan T6000 yang berpengerak motor DC seri serta JR103, T8000, dan T8500 yang berpengerak motor DC Kompon Panjang. KRL jenis ini di lapangan terkenal paling tangguh dan efisien dibandingkan KRL jenis lainnya. Sistem pengendalian motor traksi keseluruhan KRL jenis ini menggunakan sistem *Rheostatik* yang lebih murah, kemudian satu set KRL terdiri dari 4 buah *motor car* (MC) yang masing-masing dilengkapi 4 buah motor traksi sehingga mempunyai tenaga yang lebih besar.

KRL berpengerak motor AC mulai beroperasi sejak tahun 1992. Sampai saat ini terdapat 4 jenis KRL dengan traksi motor AC yakni jenis KRL VVVF Hyundai, KRL VVVF BN Holec, KRL VVVF Hitachi dan KRL-I. KRL jenis ini mempunyai keunggulan dibandingkan dengan KRL berpengerak motor DC, antara lain motor traksi AC umumnya mempunyai bobot yang ringan dibandingkan motor DC yang sejenis, tanpa komutator sehingga mudah dalam perawatan serta mempunyai kemampuan pembebanan yang lebih tinggi baik mekanis maupun termis dan yang terutama motor traksi AC khususnya motor induksi mempunyai torsi yang besar sehingga dapat memikul beban yang lebih. Namun ada satu kelemahan yang menyebabkan motor AC tidak dipergunakan sebagai motor traksi, yakni sulit untuk mengatur kecepatannya. Tetapi hal itu hanya berlaku untuk zaman dulu, perkembangan teknologi elektronika daya saat ini telah membawa industri per-keretaapi-an ke dalam teknologi VVVF (*Variabel Voltage Variabel Frequency*) yang merupakan teknologi relatif baru dalam hal pengendalian motor traksi jenis motor induksi pada KRL.

Dalam rangka pemilihan jenis KRL yang sesuai untuk jalur kereta Surabaya-Malang, untuk itu pada skripsi ini akan dibahas studi perbandingan sistem pengendali motor traksi yang mana akan berpengaruh terhadap unjuk kerja motor traksi antara KRL berpengerak traksi motor AC dan KRL berpengerak traksi motor DC dalam rangka penggunaan pada jalur rel Surabaya-Malang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka rumusan masalah pada skripsi ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana menganalisis kinerja sistem pengendali dari masing-masing motor traksi untuk setiap periode perjalanannya.
2. Bagaimana menghitung dan menganalisis perubahan torsi, waktu tempuh dan percepatan dari setiap jenis KRL terhadap perubahan gradien kemiringan jalur rel Surabaya-Malang.
3. Bagaimana menghitung dan menganalisis gaya-gaya yang bekerja pada rangkaian KRL serta kecepatan maksimum yang mampu dicapai akibat perubahan gradien kemiringan jalur rel Surabaya-Malang.

1.3 Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

Menganalisis dan membandingkan kinerja sistem pengendali motor traksi Kereta Rel Listrik (KRL) dari jenis motor AC dan motor DC pada kondisi perubahan gradien kemiringan jalur rel Surabaya-Malang.

1.3.2 Manfaat

1. Sebagai bahan pertimbangan untuk mengetahui kesesuaian penggunaan KRL pada jalur rel Surabaya-Malang.
2. Mengetahui perbandingan secara teknis antara kinerja masing-masing sistem pengendalian motor traksi terhadap unjuk kerja motor traksinya.

1.4 Batasan Masalah

Agar permasalahan mengarah sesuai dengan tujuan, maka pembahasan skripsi ini dibatasi hal-hal sebagai berikut :

1. KRL yang dibahas adalah KRL tipe VVVF Holec BN untuk KRL dengan penggerak traksi motor AC dan tipe T6000 untuk KRL dengan penggerak traksi motor DC yang telah dioperasikan oleh PT Kereta Api (Persero) Divisi Jabotabek.
2. Jaringan suplai tegangan tinggi untuk kereta listrik dianggap sama dengan di daerah Jabotabek yakni 1500 V DC.

3. Sistem pengendalian yang dibahas untuk traksi motor AC menggunakan kontrol VVVF (*Variabel Voltage Variabel Frequency*) sedangkan untuk traksi motor DC menggunakan kontrol Rheostatik.
4. Motor traksi AC yang dimaksud adalah jenis motor induksi 3 fasa tipe DMKT 55/18,5 yang dipergunakan oleh KRL VVVF Holec BN dan motor traksi DC yang dimaksud adalah motor DC seri tipe TM-6M yang dipergunakan oleh KRL Rheostatik T6000.
5. Analisis kinerja motor traksi dengan sistem pengendaliannya masing-masing difokuskan pada karakteristik torsi fungsi putaran, kecepatan maksimal yang mampu dicapai, waktu tempuh dan percepatan/perlambatan KRL untuk setiap perubahan gradien kemiringan jalur rel.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut :

- BAB I** Pendahuluan, menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat serta sistematika penulisan dari penulisan skripsi ini.
- BAB II** Tinjauan pustaka, menjelaskan tentang Kereta Rel Listrik (KRL), dinamika pergerakan KRL, rumusan gaya-gaya yang bekerja dalam KRL selama pergerakannya, sistem pengendalian motor traksi AC dan DC serta rumusan yang berkaitan dengannya.
- BAB III** Metodologi, menjelaskan tentang metodologi pengerjaan skripsi, berisi tentang metode pengambilan data serta metode analisis data.
- BAB IV** Pembahasan, yang berisi tentang data-data yang diperoleh di lapangan mencakup spesifikasi teknik KRL VVVF Holec BN dan KRL Rheostatik T6000, data-data jalur kereta Surabaya-Malang, analisis data dengan perhitungan untuk mengetahui sistem dan kinerja KRL mencakup karakteristik torsi mekanik fungsi putaran, kecepatan maksimal yang mampu dicapai, waktu tempuh dan percepatan dari masing-masing jenis KRL
- BAB V** Penutup, yang berisi tentang kesimpulan dan saran dari skripsi ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Untuk menganalisa perbandingan sistem pengendali motor traksi pada Kereta Rel Listrik untuk penggunaan pada jalur kereta Surabaya-Malang dibutuhkan pemahaman mengenai teori-teori penunjang yang mendukung. Teori-teori penunjang tersebut meliputi kereta rel listrik (KRL), motor DC sebagai motor traksi, motor AC sebagai motor traksi, pergerakan kereta rel listrik, dan gaya-gaya yang bekerja pada kereta rel listrik.

2.1 Kereta Rel Listrik (KRL)

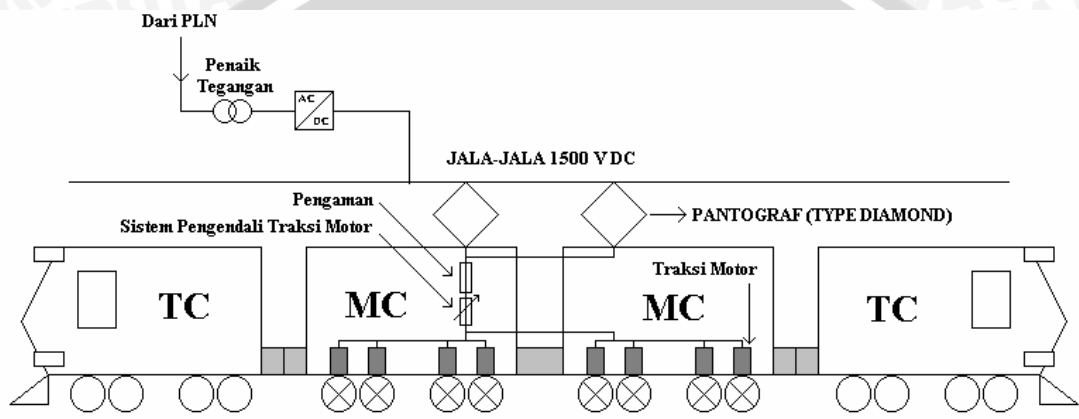
Kereta Rel Listrik (KRL) adalah sebuah kendaraan yang terdiri dari rangkaian empat buah kereta atau lebih yang tersusun secara semi permanen dan memiliki fungsi sebagai sarana pengangkut manusia dan barang dalam jumlah banyak, mempunyai tenaga penggerak sendiri yang bersumber dari tenaga listrik PLN yang telah disesuaikan melalui gardu induk PT Kereta Api.

KRL sangat cocok sebagai sarana angkutan perkotaan, hal ini dapat dilihat dari beberapa kelebihan yang dimiliki, antara lain :

1. Akselerasi dan pengereman kereta lebih baik dibandingkan sistem lainnya dikarenakan torsi motor yang tinggi sehingga hal ini dapat berpengaruh pada waktu keberangkatan dan pemberhentian kereta. Akselerasi dari lokomotif uap terbatas pada nilai 0,6 sampai dengan 0,8 km / jam detik sedangkan pada Kereta Rel Listrik, akselerasinya akan berada sekitar 3,5 km/ jam detik.
2. Biaya perawatan dan perjalanan relatif murah.
3. Sistem ini lebih ramah lingkungan karena tidak terdapat asap, uap korosif, timbal dan sebagainya serta bebas dari bahaya ledakan api atau kerusakan lainnya akibat dari uap korosif tersebut.
4. Getaran dari pengoperasian kereta lebih sedikit dikarenakan torsi yang dibangkitkan oleh motor listrik cenderung kontinyu.
5. Tidak ada kekhawatiran pemenuhan suplai daya pada kondisi beban penuh secara tiba-tiba karena ketika beban dilebihkan dari kemampuannya maka motor akan mengambil tambahan energi dari suplai jaringan secara langsung.

(Uppal, 1989:1608).

Satu set KRL terdiri atas 2 buah *trailer car* (TC) dan 2 buah *motor car* (MC) yang dipasang semi permanen. Motor traksi ditempatkan pada MC karena pada MC diletakkan juga pantograf, masing-masing 4 buah motor sehingga untuk satu *trainset* umumnya terdapat 8 buah motor traksi. Motor-motor tersebut diletakkan pada *bogie* MC dan dikopel dengan roda kereta melalui *gearbox*. *Bogie* tersebut terletak di bawah dek gerbong penumpang, sehingga KRL tidak memerlukan gerbong khusus yang berfungsi sebagai lokomotif untuk menarik gerbong penumpang.



Gambar 2.1 Konfigurasi Dasar KRL

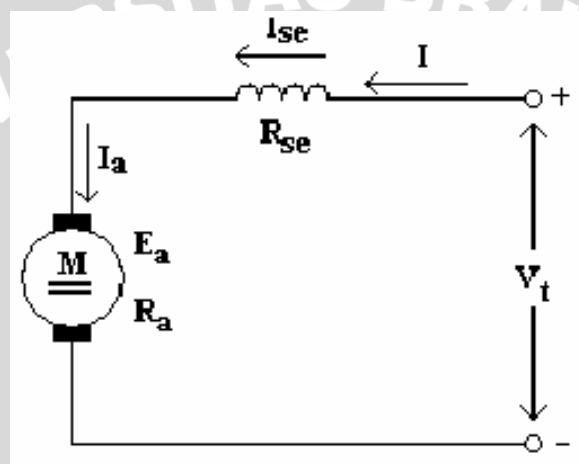
Sumber : Pusklat PT. KAI, 1998:4

Konfigurasi dasar dari sebuah sistem KRL dapat dilihat pada gambar 2.1. Untuk mengoptimalkan operasi KRL, rangkaian dapat disusun dengan komposisi *doubel unit* dengan susunan sebagai berikut : TC1–MC1–MC2–TC2–TC1–MC1–MC2–TC2 atau TC1-MC1-MC1-MC2-MC2-TC2 disesuaikan dengan kebutuhan dan kemampuan masing-masing KRL. Seperti apapun komposisi rangkaian KRL, kendali rangkaian tetap dilakukan oleh satu orang masinis dan satu orang asisten masinis yang bertempat di ruang masinis pada bagian paling depan kereta TC. Hal ini dimungkinkan karena rangkaian listrik antar rangkaian kereta terhubung dengan kabel multipel yang mempunyai 55 pin untuk DC dan 4 pin untuk AC. Suplai listrik untuk kereta diperoleh dari sistem jaringan listrik arus searah dengan tegangan 1500 V DC untuk daerah JABODETABEK. Daya disalurkan melalui saluran udara (*catenary*), kemudian melalui pantograf sebagai pengambil arus, dan daya ini digunakan untuk melayani semua kebutuhan listrik di dalam sistem kereta.

2.2 Motor DC Sebagai Motor Traksi

2.2.1 Penggerak Motor DC

Motor DC khususnya motor DC seri telah lama dipergunakan sebagai motor traksi pada KRL. Hal ini tidak lepas dari sifat motor DC seri itu sendiri yang memiliki torsi awal yang besar dan kemudahan dalam mengatur kecepatannya, kemudian motor seri tidak atau sedikit sekali terpengaruh oleh perubahan tegangan catu yang mendadak, serta untuk penambahan torsi beban yang sama diperoleh penambahan arus jangkar yang lebih kecil karena fluksinya pun ikut bertambah. Motor DC Seri mempunyai rangkaian ekivalen seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rangkaian Ekivalen Motor DC Seri

Sumber : Soemarwanto, 1988:93

Pada prinsipnya mesin listrik dapat berlaku sebagai motor maupun sebagai generator. Perbedaannya hanya terletak dalam konversi dayanya. Motor mengubah daya masuk listrik menjadi daya keluar mekanik. Hubungan antara tegangan sumber V_t dengan tegangan jangkar E_a berdasarkan gambar 2.2 diatas dapat dituliskan sebagai :

$$\bullet \quad V_t = E_a + I_a R_a + I_{se} R_{se} \quad (2-1)$$

$$\bullet \quad I = I_{se} = I_a \quad (2-2)$$

Selain itu pada motor arus searah juga berlaku persamaan :

$$\bullet \quad E_a = c.n.\Phi \quad (2-3)$$

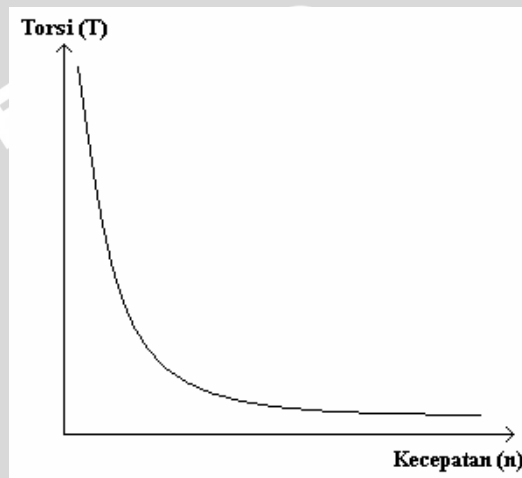
$$\bullet \quad T = c.\Phi.I_a \quad (2-4)$$

sehingga putaran pada motor DC seri dapat dirumuskan sebagai :

$$\bullet \quad n = \frac{V_t - I(R_a + R_{se})}{c.\Phi} \quad (2-5)$$

Pada motor DC seri, bertambahnya kopel (artinya arus jangkar juga bertambah besar) akan menyebabkan pula bertambahnya nilai fluks (Φ), karena fluks pada motor seri merupakan fungsi arus jangkar (I_a). Dari rangkaian motor seri terlihat bahwa untuk nilai arus jangkar sama dengan nol, nilai fluks juga nol, sehingga dari persamaan terakhir di atas diperoleh nilai n menuju tak terhingga. Sedangkan untuk nilai I_a yang cukup besar, nilai n pada persamaan di atas akan mendekati nol.

Dengan demikian karakteristik torsi-kecepatan untuk motor DC seri dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Kurva Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor DC Seri

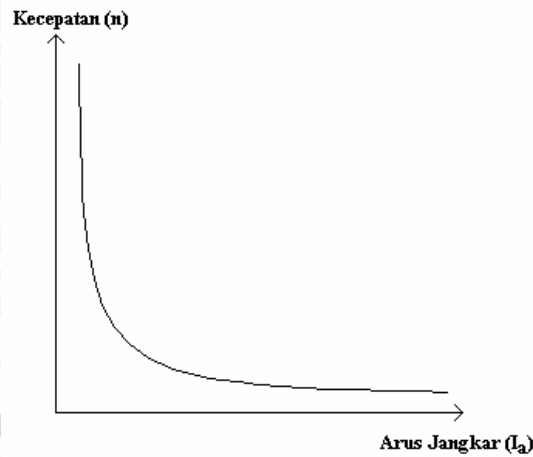
Sumber : Zuhail, 1991:152

Dari gambar 2.3 diatas dapat terlihat bahwa pada motor DC seri akan diperoleh torsi starting yang tinggi, hal inilah yang dibutuhkan oleh suatu sistem traksi KRL karena dari keadaan diam KRL harus mampu memikul beban yang berat untuk mulai bergerak.

Kemudian pada motor DC seri, arus jangkarnya juga berfungsi sebagai arus penguatan medan, sehingga berlaku :

$$\bullet \quad n = \frac{V_t - I(R_a + R_{se})}{c \cdot \Phi} \approx \frac{V}{c \cdot \Phi} \approx \frac{V}{I_a} \quad (2-6)$$

Dari persamaan diatas, maka dapat diketahui bahwa besar kecepatan (n) berbanding terbalik dengan arus jangkarnya (I_a). Apabila digambarkan maka karakteristik kecepatan-arus jangkar adalah sebagai berikut :



Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Kecepatan-Arus Jangkar Motor DC Seri

Sumber : Zuhal, 1991:156

2.2.2 Sistem Pengendalian Rheostatik.

Secara umum prinsip kerja KRL ialah merubah daya listrik menjadi daya mekanik, dimana tegangan listrik telah tersedia pada jaringan saluran atas. Arus listrik mengalir ke dalam kereta melalui suatu alat yang disebut pantograf dan beberapa perangkat pengaman serta perangkat pengendali motor traksi dan berakhir pada traksi motor.

Pergerakan kereta harus melalui pengaturan agar saat berangkat ataupun berhenti terasa nyaman. Ada beberapa macam cara untuk pengaturan kecepatan pada motor DC yakni dengan cara mekanis melalui perpindahan roda-roda gigi ataupun dengan cara elektrik melalui pengaturan tegangan jepitan motor (V_t), pengaturan tahanan jangkar (R_a), atau pengaturan fluksi (Φ).

Untuk pengaturan kecepatan pada KRL dengan traksi motor DC seri adalah dengan jalan mengatur nilai tegangan yang masuk ke dalam traksi motornya. Untuk menghasilkan tegangan yang bervariasi tersebut, diterapkan sistem hubungan seri-paralel pada rangkaian traksi motor dan dipasang tahanan depan agar saat perubahan tegangan terjadi yang dikendalikan oleh masinis tidak timbul hentakan/kejutan. Sistem ini dinamakan dengan sistem Rheostatik.

Sistem ini bekerja berdasarkan sifat dari traksi motor DC seri antara lain :

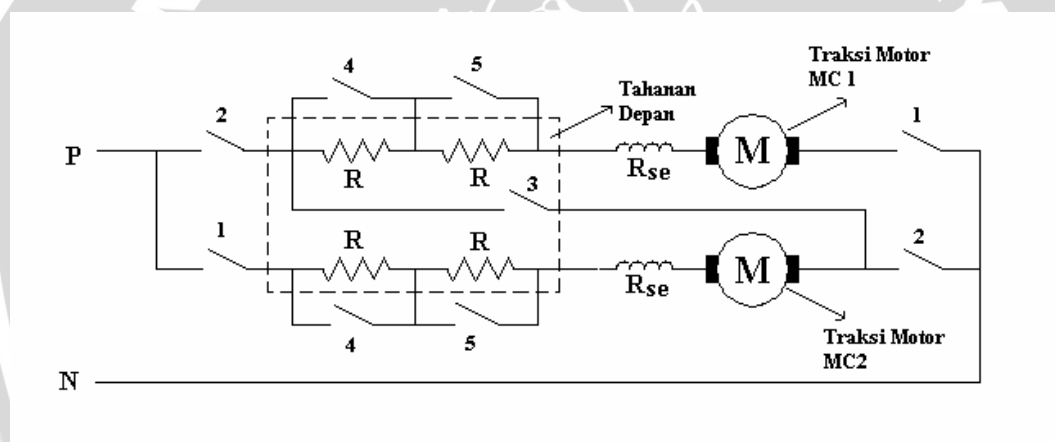
1. Motor harus selalu berbeban (bila dialiri arus listrik).
2. Arus mula harus dibatasi.

3. Dengan mengatur besarnya tegangan, banyaknya arus yang mengalir ke dalam motor dapat diatur sehingga putaran dapat dikendalikan agar kuat memutar beban.

Pengaturan kecepatan dengan sistem Rheostatik pada KRL secara prinsip adalah sebagai berikut :

1. Memasang tahanan depan. Dengan merubah nilai tahanan depan, akan berubah pula besarnya arus yang mengalir ke dalam traksi motor.
2. Menghubungkan seri beberapa traksi motor akan menghasilkan putaran yang lebih rendah.
3. Menghubungkan paralel beberapa traksi motor akan menghasilkan putaran yang lebih tinggi.

(Pusdiklat PT.KAI, 1998:12)



Gambar 2.5 Rangkaian Sederhana Sistem Rheostatik

Sumber : Pusdiklat PT. KAI, 1998:13

Dalam pelayanannya, pengaturan kecepatan dilakukan oleh masinis dengan jalan memutar handel tenaga (*master control*) yang umumnya dapat dibagi secara garis besar menjadi 4 tingkat (*notch*) sebagai berikut :

1. *Notch 1 (Start)*

Posisi ini hanya dipakai saat gerak mula saja selama kurang dari 1 menit. Pada kondisi ini berurutan dimasukkan sakelar 1 dan 3 atau motor dihubungkan seri dengan melalui tahanan depan R. Nilai dari tahanan depan maksimum dan kecepatan KRL antara 0-20 km/jam.

2. *Notch 2.*

Pada posisi ini, kedudukan tahanan depan sudah mulai mengurangi nilai tahanannya dan kecepatan juga meningkat. Sakelar 4 dan 5 dimasukkan dan motor masih terhubung seri. Kecepatan KRL antara 20-40 km/jam.

3. *Notch 3*

Pada saat memasuki posisi notch 3 ini, terjadi masa transisi yaitu dari hubungan motor seri menjadi hubungan paralel. Sakelar 2 dimasukkan bersamaan dengan dilepasnya sakelar 3, 4 dan 5. Motor akhirnya terhubung paralel melalui tahanan depan R. Motor terhubung paralel setiap 4 buah dan kecepatan KRL antara 40-75 km/jam.

4. *Notch 4*

Pada saat posisi notch 4 ini, hubungan traksi motor adalah paralel. Sakelar 4 dan 5 dimasukkan kembali sehingga motor terhubung paralel tanpa melalui tahanan depan R. Arus medan magnet pada tiap traksi motor diperkecil sehingga didapat putaran traksi motor yang lebih tinggi. Kecepatan KRL antara 75-100 km/jam.

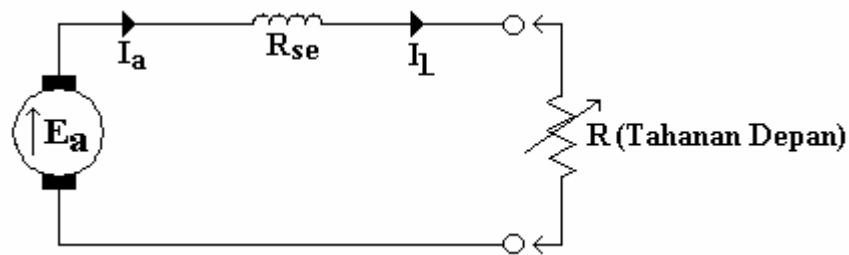
Jika setiap motor dilewati arus yang sama, yakni I , maka tegangan terpasang pada setiap motor yang dihubungkan seri adalah $V/2$. Sedangkan pada setiap motor yang terhubung paralel, maka tegangan yang dirasakan motor adalah sama dengan tegangan jala-jala, yaitu V , namun arusnya adalah sama dengan $I/2$. Berdasarkan kurva karakteristik kecepatan – arus jangkar dapat diketahui bahwa dengan menurunnya arus jangkar maka kecepatannya akan bertambah sesuai dengan kondisi KRL pada posisi *notch 4*.

(Pusdiklat PT.KAI, 1998:12)

Pengereman pada KRL dilakukan oleh masinis melalui handel pengereman (*Brake Valve Handle*), kecuali rem darurat juga terdapat pada ruang penumpang (dapat dilakukan oleh siapapun). Terdapat 3 jenis pengereman yang ada pada KRL yaitu :

1. *Electro Pneumatic Air Brake*.

Sistem pengereman ini yang paling efektif bekerja, karena selain dilengkapi *brake valve type self lapping*, juga dilengkapi dengan *magnet valve*, sehingga proses pengereman dan pelepasan bekerja secara sinkron antar kereta. Pada kereta MC, pengereman *electro pneumatic* ini ditekankan pada pengereman dinamik secara efisien. Pengereman dinamik ialah pengereman dengan memanfaatkan arus listrik traksi motor yang dialirkan ke tahanan depan (resistor) sebagai beban.



Gambar 2.6 Rangkaian Sederhana Pengereman Dinamik

Sumber : Zuhail, 1991:155

Pada pengereman dinamik, penghentian motor dapat terjadi jika tegangan terminal (V_t) dihilangkan dan diganti oleh tahanan depan R . Dalam keadaan ini energi putaran diberikan pada tahanan R , yang menyebabkan kecepatan menjadi turun, demikian pula tegangan E_a pun akan menurun. Pada saat ini motor berfungsi sebagai generator tanpa penggerak mula. Untuk menjaga penurunan kopel yang konstan, R harus pula diturunkan. Harga R dipilih sedemikian rupa sehingga arus jangkar tidak terlalu besar. Besarnya arus pengereman yang dialirkan ke resistor dikendalikan oleh *load-detector*. Kekuatan pengereman dinamik pada KRL akan disesuaikan dengan banyaknya penumpang./beban dan hal ini dideteksi oleh *load-actuator*.

Pada kondisi jalan menurun, berlaku pengereman regeneratif pada KRL, dimana biasanya kecepatan motor laju sekali. Karenanya $E_a > V_t$, yang mengakibatkan daya dikembalikan kepada sistem jala-jala untuk keperluan lain. Pada saat daya dikembalikan ke jala-jala, kecepatan menurun dan proses pengereman berlangsung seperti pada pengereman dinamik.

2. *Automatic Air Brake.*

Sistem pengereman ini dapat dikatakan sebagai pengereman cadangan pada KRL, dimana sistem ini hanya bekerja apabila sistem *electro pneumatic air brake* tidak bekerja dengan baik atau rangkaian KRL dirangkai dengan kereta bukan KRL.

3. *Emergency Air Brake.*

Sistem pengereman ini hanya bekerja apabila :

- Handel pengereman digeser pada posisi *emergency* oleh masinis.
- Katup *emergency* (di ruang masinis atau ruang penumpang) ditarik.

- Rangkaian KRL terputus/terlepas.

(Pusdiklat PT.KAI, 1998:18)

2.3 Motor Induksi Sebagai Motor Traksi.

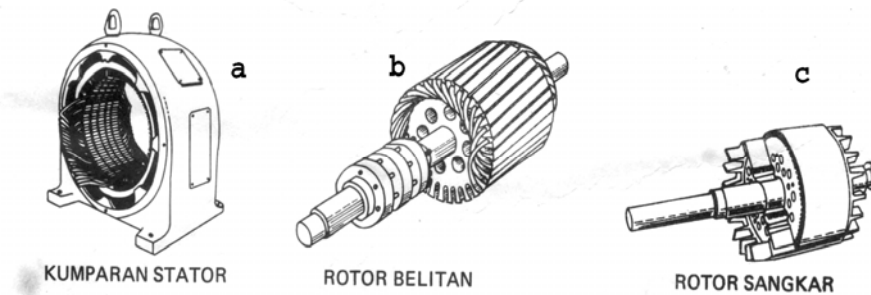
Kereta listrik modern memiliki beberapa kekhasan antara lain daya traksi yang tinggi dan penggunaan energi yang optimal. Beberapa waktu yang lalu motor DC seri banyak digunakan sebagai motor traksi untuk kereta rel listrik karena memiliki torsi awal yang tinggi dan kecepatan yang variabel. Namun seiring dengan perkembangan teknologi elektronika daya maka penggunaan motor DC seri sebagai motor traksi perlahan mulai digantikan oleh motor induksi karena adanya beberapa keunggulan berikut :

1. Ringan, (20-40)% lebih ringan dibandingkan dengan motor DC dengan kapasitas yang sama.
2. Kokoh dan kompak, tanpa komutator sehingga sangat mudah dan murah dalam perawatan.
3. Putaran yang diizinkan dapat lebih tinggi karena tidak mempunyai komutator.
4. Tahan terhadap guncangan dan tekukan.
5. Tahan terhadap perubahan iklim.
6. Mempunyai kemampuan pembebanan yang lebih tinggi baik mekanis maupun termis.

(PINDAD, 1994:2)

Konstruksi motor induksi terdiri dari dua buah bagian yaitu bagian stator dan bagian rotor. Inti dan belitan stator dari motor induksi tiga fasa sama dengan inti dan belitan stator pada motor sinkron, perbedaannya terletak pada konstruksinya dari rotornya. Rotor pada motor induksi ada dua macam, yaitu rotor belitan dan rotor sangkar. Motor induksi dengan rotor belitan mempunyai rotor dengan belitan tiga fasa sama seperti belitan stator (Gambar 2.7(b)). Motor induksi jenis ini dapat ditambah dengan tahanan luar sehingga dapat membuat kopel mula mencapai harga kopel maksimum. Selain itu tahanan luar tersebut juga berfungsi untuk membatasi arus mula yang besar pada saat start.

Motor induksi jenis rotor sangkar mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa, sehingga menyerupai sangkar tupai (Gambar 2.7 (c)).



Gambar 2.7 Motor Induksi Rotor Sangkar dan Rotor Belitan

Sumber: Zuhail, 1991:64.

Konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor belitan, karena itu harganya menjadi murah. Pada motor induksi rotor sangkar kita tidak dapat menambahkan tahanan luar. Untuk membatasi arus mula yang besar, pada motor induksi rotor sangkar digunakan ototransformator atau saklar Y dan Δ , tetapi berkurangnya arus mula akan menyebabkan kopel mula menurun.

Adapun motor AC dalam aplikasinya (kecepatan variabel), memerlukan pengaturan frekuensi, tegangan dan arus. Untuk keperluan tersebut diperlukan konverter daya, inverter dan pengaturan tegangan AC yang frekuensi, tegangan dan/atau arusnya dapat diatur. Konverter-konverter daya tersebut relatif kompleks dan mahal, serta memerlukan teknik pengaturan umpan-balik yang lebih lanjut. Akan tetapi keuntungan penggerak AC lebih banyak daripada kerugiannya.

2.3.1 Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi dapat dijelaskan sebagai berikut, apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator, timbul medan putar dengan kecepatan

$$n_s = \frac{120 \cdot f_1}{p} \quad (2-7)$$

dengan p adalah jumlah kutub dan f_1 adalah frekuensi stator dalam hertz. Medan putar tersebut akan memotong batang konduktor di rotor. Akibatnya pada rotor timbul tegangan induksi (ggl) sebesar :

$$E_{2s} = 4,44 f_2 N_2 \phi_m \quad (\text{untuk satu fasa}). \quad (2-8)$$

dimana E_{2s} adalah tegangan induksi pada saat rotor berputar, f_2 adalah frekuensi rotor dan N_2 jumlah konduktor di rotor. Karena rotor merupakan rangkaian tertutup, maka ggl tersebut akan menghasilkan arus. Adanya arus di dalam medan magnet tersebut akan menimbulkan gaya (F) pada rotor. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.

Tegangan induksi timbul akibat terpotongnya batang konduktor di rotor oleh medan magnet stator, sehingga untuk menghasilkan tegangan induksi, diperlukan perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan berputar rotor (n_r). Perbedaan kecepatan tersebut disebut dengan kecepatan $slip(n_{sl})$, dalam per-unitnya disebut $slip$ dan dinyatakan dengan :

$$n_{sl} = n_s - n_r \quad (2-9)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2-10)$$

$$n_{sl} = s \cdot n_s \quad (2-11)$$

Apabila $n_s = n_r$, maka tidak akan timbul induksi dan tidak ada arus yang mengalir di rotor sehingga tidak menghasilkan kopel. Hubungan antara frekuensi dengan $slip$ dapat dilihat sebagai berikut :

$$n_s = \frac{120 \cdot f_1}{p} \quad \text{atau} \quad f_1 = \frac{p \cdot n_s}{120} \quad (2-12)$$

Sedangkan pada rotor berlaku hubungan :

$$f_2 = \frac{p \cdot (n_s - n_r)}{120} \quad \text{atau} \quad f_2 = \frac{p \cdot n_s}{120} \cdot \frac{n_s - n_r}{n_s} = f_1 \cdot s \quad (2-13)$$

Sehingga pada saat start $s = 100\%$ atau $f_2 = f_1$. Dengan demikian terlihat bahwa pada saat start dan rotor belum berputar, frekuensi pada stator dan rotor sama. Dalam keadaan rotor berputar, frekuensi arus rotor dipengaruhi oleh $slip$.

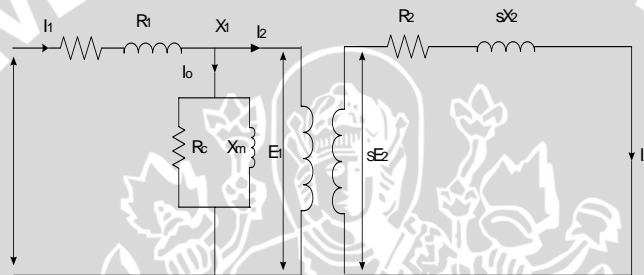
Karena tegangan induksi dan reaktansi kumparan rotor merupakan fungsi frekuensi maka nilainya dipengaruhi juga oleh $slip$.

$$\begin{aligned} E_{2s} &= 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \phi_m \\ &= 4,44 \cdot s f_1 \cdot N_2 \cdot \phi_m \\ &= s E_2 \end{aligned} \quad (2-14)$$

dengan : E_2 = Tegangan induksi pada saat start (diam).
 E_{2s} = Tegangan induksi pada saat motor berputar.
 ϕ_m = Fluksi magnetisasi.

2.3.2 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Kinerja motor induksi seperti juga kerja transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Oleh karena itu motor induksi dapat dianggap sebagai transformator dengan rangkaian sekunder yang berputar. Stator merupakan kumparan sisi primer sedangkan rotor merupakan kumparan sisi sekunder. Dengan demikian rangkaian motor induksi dapat digambarkan seperti pada gambar 2.8 berikut.



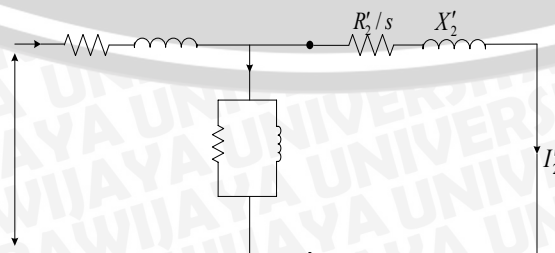
Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Sumber: Zuhail, 1991:71.

Persamaan tegangan pada rangkaian rotor adalah :

$$\begin{aligned} E_{2s} &= I_2 Z_2 \\ sE_2 &= I_2 (R_2 + jsX_2) \\ E_2 &= I_2 (R_2/s + jX_2) \end{aligned} \quad (2-15)$$

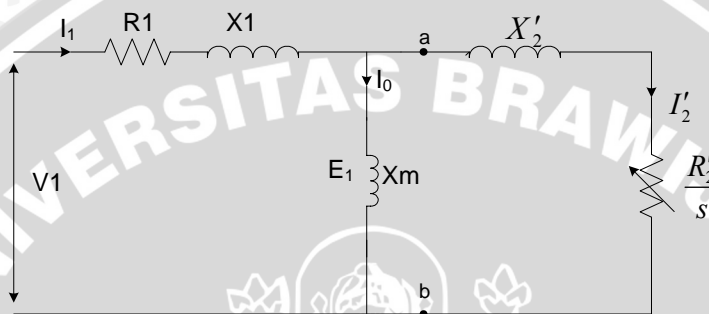
sehingga rangkaian pengganti gambar menjadi seperti pada gambar 2.9 dengan sisi primer sebagai referensi,



Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi (Sisi Primer Sebagai Referensi)

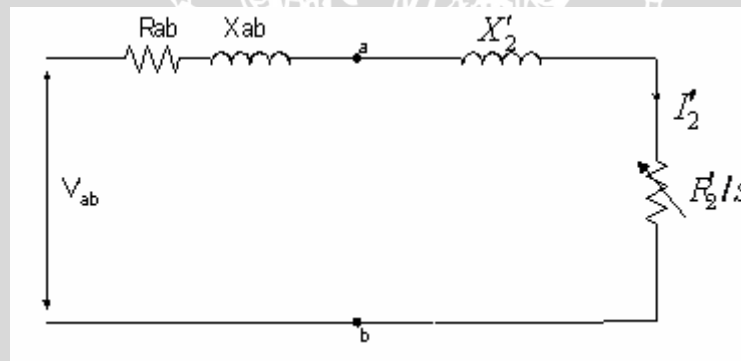
Sumber: O' Kelly, 1992:247.

Pada motor induksi, arus magnetisasi besarnya berkisar 30 sampai 50% arus nominalnya (P.C.Sen,1989:242). Gambar 2.10 merupakan rangkaian ekivalen motor induksi yang direkomendasikan *IEEE*. Pada operasi tegangan dan frekuensi masukan konstan, rugi inti stator dan rugi gesek dan angin juga konstan. Motor induksi yang berkapasitas daya menengah dan besar, resistansi statornya sangat besar dan rugi inti stator relatif kecil sehingga untuk penyederhanaan dalam analisis, resistansi stator dapat diabaikan (Fitzgerald, 1992:334).



Gambar 2.10 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Rekomendasi *IEEE*.

Sumber: P.C. Sen, 1989:242



Gambar 2.11 Rangkaian Penyederhanaan Dengan Teorema *Thevenin*

Sumber: P.C. Sen, 1989:243

Dengan menggunakan teorema *Thevenin*, maka rangkaian ekivalen pada gambar 2.10 dapat disederhanakan seperti pada gambar 2.11. Impedansi pengganti untuk R_1 dan X_1 dimisalkan Z_1

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (2-16)$$

$$Z_{ab} = \frac{jX_m \cdot Z_1}{jX_m + Z_1} \quad (2-17)$$

$$V_{ab} = \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \cdot V_1 \quad (2-18)$$

$$Z_{ab} = R_{ab} + jX_{ab} \quad (2-19)$$

$$I_2' = \frac{V_{ab}}{\sqrt{\left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{ab} + X_2')^2}} \quad (2-20)$$

dengan : I_2' : Arus rotor yang disetarakan pada sisi stator

I_1 : Arus masukan motor induksi

I_0 : Arus magnetisasi

R_1 : Resistansi stator

X_1 : Reaktansi bocor pada stator

R_2' : Resistansi rotor yang disetarakan pada stator

X_2' : Reaktansi bocor pada rotor yang disetarakan pada stator

R_c : Resistansi inti stator.

X_m : Reaktansi pemagnitan.

V_{ab} : Tegangan *Thevenin*

Z_{ab} : Impedansi *Thevenin*

R_{ab} : Resistansi *Thevenin*

X_{ab} : Reaktansi *Thevenin*

E_m : Tegangan magnetisasi

2.3.3 Karakteristik Torsi Motor Induksi Tiga Fasa

Torsi yang dihasilkan oleh motor terdiri dari 3 yaitu :

1. Torsi Nominal.
2. Torsi Maksimum.
3. Torsi Starting.

Torsi Mekanik (T_{mek}) yang dibangkitkan motor induksi 3 fasa dapat diperoleh dari persamaan

$$T_{mek} = \frac{P_{mek}}{\omega_r} = \frac{3I_2'^2 \frac{R_2'}{s}(1-s)}{\omega_r} \quad (2-21)$$

$$T_{mek} = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{3I_2'^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_s} \quad (2-22)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60}, \quad \omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (2-23)$$

Dengan menggabungkan persamaan 2-20 dan persamaan 2-22, maka T_{mek} 3 fasa adalah

$$T_{mek} = \frac{3V_{ab}^2 \left(\frac{R_2'}{s} \right)}{\omega_s \left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(X_{ab} + X_2' \right)^2} \quad (2-24)$$

Pada persamaan 2-24 dinyatakan bahwa besarnya torsi mekanik sebanding dengan kuadrat dari V_{ab} , sedangkan V_{ab} sebanding dengan tegangan masukan dari terminal motor induksi, sesuai dengan persamaan 2-18. Gambar 2.12 menunjukkan torsi mekanik sebagai fungsi dari putaran rotor. Torsi mekanik akan turun jika tegangan stator diturunkan dari nilai nominalnya. Torsi maksimum (T_{max}) pada daerah operasi motor, sesuai dengan gambar 2.12 disebut juga *breakdown torque* atau *pull-out torque*.

$$T_{max} = \frac{3V_{ab}^2 \frac{R_2'}{s_m}}{\omega_s \left(\left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s_m} \right)^2 + \left(X_{ab} + X_2' \right)^2 \right)} \quad (2-25)$$

Slip maksimum pada motor induksi diperoleh dari penurunan T_{mek} terhadap slip, dimana

$$\frac{dT_{mek}}{ds} = 0, \text{ sehingga}$$

$$\frac{dT_{mek}}{ds} = \frac{0 - 3V_{ab}^2 R_2' \left(\omega_s \left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + s \omega_s \left(2 \left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s} \right) \left(-\frac{R_2'}{s^2} \right) \right) + \omega_s \left(X_{ab} + X_2' \right)^2 \right)}{s^2 \omega_s^2 \left(\left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(X_{ab} + X_2' \right)^2 \right)^2} = 0$$

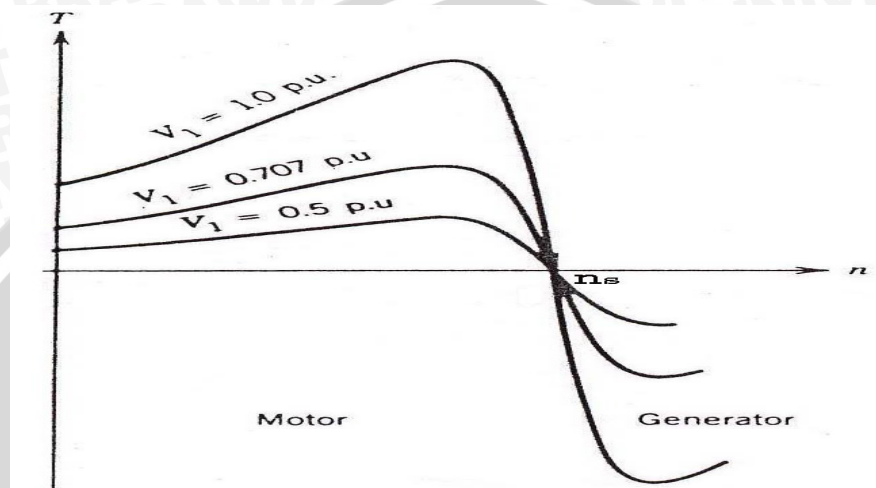
$$0 = \left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 - 2 \frac{R_2'}{s} \left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s} \right) + \left(X_{ab} + X_2' \right)^2$$

$$0 = R_{ab}^2 + 2R_{ab} \frac{R_2'}{s} + \frac{R_2'^2}{s^2} - 2R_{ab} \frac{R_2'}{s} - 2 \frac{R_2'^2}{s^2} + \left(X_{ab} + X_2' \right)^2$$

$$0 = R_{ab}^2 - \frac{R_2'^2}{s^2} + \left(X_{ab} + X_2' \right)^2$$

$$s_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_{ab}^2 + \left(X_{ab} + X_2' \right)^2}} \quad (2-26)$$

s_m merupakan slip pada saat torsi maksimum dari motor induksi tercapai, sesuai dengan persamaan 2-26. Torsi nominal berkisar antara 0.4-0.5 dari torsi maksimumnya (McPherson,1990:265). Pada operasi motor induksi dengan tegangan masukan yang bervariasi, torsi maksimum akan tercapai pada nilai s_m yang sama, karena s_m tidak akan berubah selama frekuensi sumber dijaga pada nilai nominal motor induksi.



Gambar 2.12 Grafik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Dengan Tegangan Stator Variabel.

Sumber : P.C.Sen, 1989:250

Pada saat KRL melakukan proses starting, $n_r = 0$ sehingga slip bernilai 1, oleh karenanya torsi starting dirumuskan dengan :

$$T_{starting} = \frac{3V_{ab}^2(R_2')}{\omega_s(R_{ab} + R_2')^2 + (X_{ab} + X_2')^2}$$

Pada kondisi beban yang berubah-ubah, karakteristik torsi mekanik sebagai fungsi dari putaran akan turun jika tegangan masukan ke motor diturunkan.

Sesuai dengan gambar 2.10, nilai arus stator (I_1) adalah

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_t} = I_0 + I_2' \quad (2-27)$$

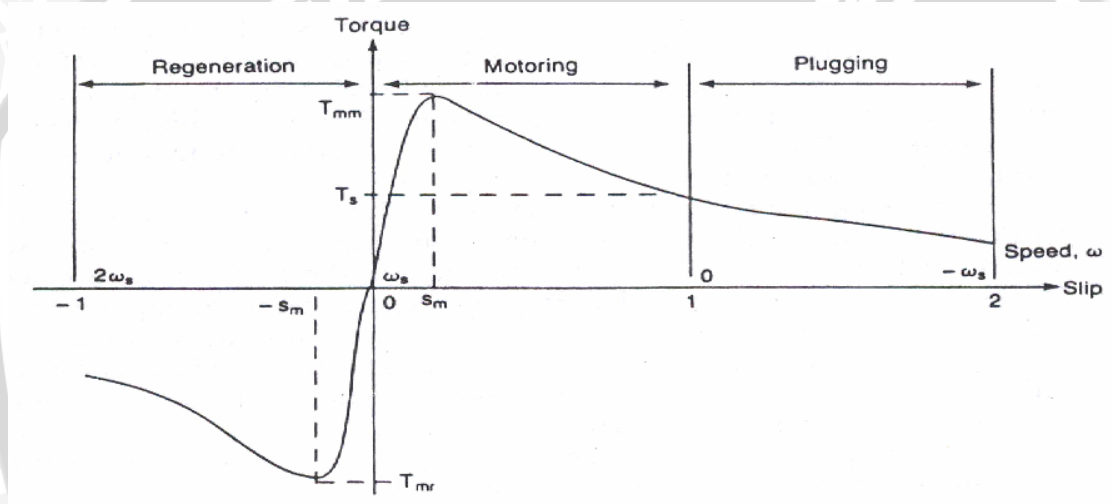
sedangkan impedansi totalnya adalah

$$Z_t = Z_1 + \frac{jX_m \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2' \right)}{\frac{R_2'}{s} + (jX_m + jX_2')} \quad (2-28)$$

Pada putaran sinkron ($s = 0$), R'_2/s tak terhingga, sehingga $I'_2 = 0$. Arus I_1 hanya akan membangkitkan I_0 . Pada nilai slip yang besar mengakibatkan I'_2 dan I_1 menjadi besar. Arus stator (Gambar 2.10) dapat juga ditentukan dengan menggunakan persamaan 2-29b

$$I'_2 = \frac{jX_m}{\frac{R'_2}{s} + j(X_m + X'_2)} I_1 \quad (2-29a)$$

$$I_1 = \frac{\frac{R'_2}{s} (jX_m + X'_2)}{jX_m} I'_2 \quad (2-29b)$$



Gambar 2.13 Kurva Karakteristik Torsi Kecepatan

Sumber : M.H. Rashid, 1988:343

Operasi *reverse motoring* dan *regeneratif braking* diperoleh dengan membalik urutan fasa dari terminal motor-nya. Karakteristik torsi kecepatan yang membalik ditunjukkan dengan garis putus-putus.

Terdapat tiga daerah operasi motor :

1. Operasi *motoring*, $0 \leq s \leq 1$

Motor berputar searah dengan medan magnet putar dan slip akan naik torsi juga akan naik dengan fluksi celah udara yang konstan. Ketika torsi mencapai nilai maksimumnya, T_m pada $s = s_m$, maka torsi akan turun ketika slip naik akibat dari berkurangnya fluksi celah udara.

2. Operasi *regeneratif*

Kecepatan motor ω_r lebih besar dari kecepatan sinkron ω_s , dimana ω_r dan ω_s searah dan slip-nya negatif maka $\frac{R_2}{s}$ negatif. Hal ini berarti bahwa daya dari poros motor dikembalikan ke rangkaian rotor dan motor bekerja sebagai generator sehingga motor mengembalikan daya ke sumber. Karakteristik torsi kecepatan mirip dengan operasi motoring tetapi terletak di daerah torsi negatif.

3. Operasi *Reverse Plugging*

Kecepatan motor akan berlawanan dengan arah medan putar dan slip lebih besar satu. Hal ini dapat terjadi bila urutan fasa sumber dibalik ketika *forward motoring*, sehingga arah medan juga terbalik. Torsi yang dihasilkan berlawanan arah dengan arah gerakan sehingga terjadi pengereman. Karena $s > 1$, arus motor sangat besar, akan tetapi torsi yang dihasilkan kecil. Energi akibat dari plugging akan didisipasikan ke motor sehingga menyebabkan panas yang berlebihan pada motor, oleh karenanya jenis pengereman ini tidak umum digunakan.

2.3.4 Perangkat Pengendalian Motor Traksi AC

Kehadiran elektronika daya pada motor induksi telah berhasil mengatasi hambatan teknis dan ekonomis yang selama ini banyak membatasi keunggulannya sebagai tenaga penggerak. Melalui penggunaan semi konduktor daya akan diperoleh pengaturan yang halus (kontinyu), kerugian daya yang kecil dan pemeliharaan yang lebih sederhana untuk motor induksi.

Berdasarkan persamaan torsi motor induksi, maka motor induksi dapat diatur kecepatannya dengan salah satu cara berikut ini :

1. Kontrol tegangan stator.
2. Kontrol tegangan rotor.
3. Kontrol frekuensi.
4. Kontrol tegangan dan frekuensi.
5. Kontrol arus rotor.
6. Kontrol tegangan, arus dan frekuensi.

Kereta Rel Listrik menggunakan sistem kontrol tegangan dan frekuensi atau yang lebih dikenal dengan sistem VVVF (*Variabel Voltage Variabel Frequency*) dikarenakan alasan-alasan sebagai berikut :

1. Sistem kontrol tegangan stator tidak sesuai untuk beban dengan torsi konstan dan pada umumnya digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan torsi starting

rendah dan range kecepatannya sempit pada slip relatif rendah. Hal ini berlawanan dengan sistem KRL yang membutuhkan torsi starting yang tinggi.

2. Sistem kontrol tegangan rotor dapat menaikkan torsi starting dan membatasi arus starting. Akan tetapi metode ini tidak efisien, karena kemungkinan terjadi tidak seimbangnya arus dan tegangan pada rotor jika pada rangkaian resistornya tidak sama.
3. Sistem kontrol frekuensi mengubah-ubah nilai frekuensi pada kondisi yang diinginkan sehingga fluksinya pun akan berubah-ubah nilainya. Akan tetapi dengan sistem ini, apabila dengan tegangan tetap frekuensinya dinaikkan diatas nilai nominalnya, maka fluksi dan torsi akan turun dan tentunya ini tidak diinginkan untuk sebuah sistem KRL. Sedangkan bila frekuensi diubah dibawah nilai nominalnya, maka fluksinya akan naik dan mengakibatkan kejenuhan pada fluksi celah udara sehingga parameter motor tidak valid lagi digunakan untuk menentukan karakteristik torsi kecepatan. Selain itu pada frekuensi rendah, reaktansi akan turun sehingga arus motor menjadi tinggi.

Sistem kontrol tegangan dan frekuensi mengatasi semua permasalahan diatas, bila perbandingan tegangan dan frekuensi dipertahankan konstan, maka fluksi akan bertahan konstan.

Pada KRL VVVF Holec BN, berlaku dua buah pengaturan selama pengoperasian yakni kontrol frekuensi (*Field Weakening*) dan kontrol tegangan dan frekuensi (VVVF).

2.3.4.1 Pengaturan Putaran Motor Induksi Dengan Variasi Frekuensi Stator

Torsi dan putaran motor induksi dapat dikontrol dengan merubah frekuensi masukan motor. Aplikasi metode pengaturan putaran ini membutuhkan komponen elektronika daya yang dapat mengubah frekuensi. Pengaturan putaran motor induksi dapat dilakukan dengan variasi frekuensi di bawah maupun di atas frekuensi nominal motor.

Jika pengoperasian motor induksi dilakukan dengan variasi frekuensi di bawah nominal dan tegangan masukan dijaga pada nilai nominal, maka fluksi magnetisasi akan meningkat dan mencapai titik jenuhnya. Kejadian ini akan menyebabkan parameter motor induksi tidak bisa digunakan untuk menentukan karakteristik torsi fungsi putaran

dan reaktansi bocor akan turun sehingga arus akan naik. Metode variasi frekuensi ini tidak baik digunakan untuk mengatur putaran motor induksi (M.Rashid, 1988:357).

Pengoperasian motor induksi dengan frekuensi stator di atas frekuensi nominal dapat dilakukan dengan menjaga tegangan nominal motor konstan karena berhubungan dengan batas yang digunakan isolasi stator dan batas tegangan dari inverter yang digunakan. Tegangan stator dijaga konstan pada nilai nominalnya, maka fluksi magnetasi dan torsi akan menurun dengan naiknya frekuensi stator. Model operasi motor induksi ini disebut *field weakening mode*. Misalkan a adalah perbandingan antara frekuensi kerja motor dan frekuensi nominal motor maka :

$$a = \frac{f}{f_{nom}} \quad (2-30)$$

$$s = \frac{a\omega_s - \omega_r}{a\omega_s} \quad (2-31)$$

$$Z_{ab} = \frac{ajX_m(R_1 + ajX_1)}{R_1 + aj(X_1 + X_m)} = R_{ab} + jX_{ab} \quad (2-32)$$

$$I_2' = \frac{V_{ab}}{\sqrt{\left(R_{ab} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{ab} + aX_2')^2}} \quad (2-33)$$

Perubahan frekuensi masukan motor akan mengubah besarnya nilai reaktansi yang nilainya merupakan perkalian antara faktor a dengan reaktansi pada frekuensi nominal.

Torsi mekanik dan torsi maksimum pada persamaan 2-24 dan 2-25 menjadi

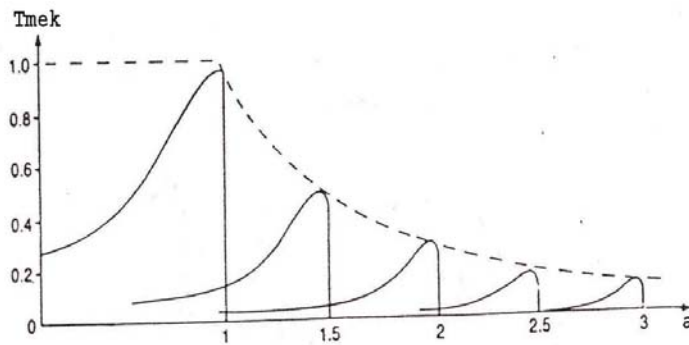
$$T_{mek} = \frac{V_{ab}^2 (R_2' / s)}{a\omega_s (R_{ab} + R_2' / s)^2 + (X_{ab} + aX_2')^2} \quad (2-34)$$

$$T_{max} = \frac{3V_{ab}^2 \frac{R_2'}{s_m}}{a\omega_s \left((R_{ab} + \frac{R_2'}{s_m})^2 + (X_{ab} + aX_2')^2 \right)} \quad (2-35)$$

Slip pada torsi maksimum (s_m) menjadi

$$s_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_{ab}^2 + (X_{ab} + aX_2')^2}} \quad (2-36)$$

Karakteristik torsi fungsi putaran dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Karakteristik Torsi Fungsi Putaran Diatas Nominal

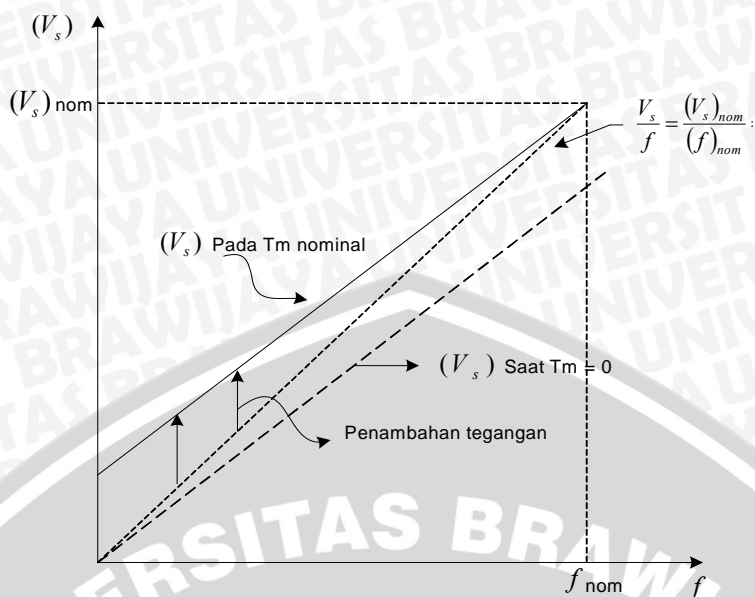
Sumber: Rashid,1988: 357

2.3.4.2 Pengaturan Putaran Dengan Variasi Tegangan dan Frekuensi Stator (VVVF)

Pengaturan putaran dengan variasi tegangan dan frekuensi stator dilakukan pada operasi putaran motor induksi di bawah nominal atau frekuensi stator di atas nominal. Operasi variasi frekuensi di bawah frekuensi nominal biasanya dilakukan dengan menurunkan tegangan fasa stator motor dengan menjaga rasio tegangan dan frekuensi sama dengan rasio tegangan dan frekuensi nominalnya. Operasi ini dilakukan untuk mencegah naiknya fluksi magnetisasi dari nilai nominalnya.

Pada pengoperasian dengan tegangan dan frekuensi konstan, untuk nilai tegangan dan frekuensi yang rendah pengaruh jatuh tegangan pada resistansi stator tidak bisa diabaikan. Jatuh tegangan di resistansi stator menyebabkan tegangan (E_1) juga akan turun sehingga fluksi magnetasi akan berubah. Pada pengaturan rasio V/f konstan motor induksi tidak bisa dioperasikan untuk menjaga fluksi celah udara yang konstan (Gopal,1993:230)

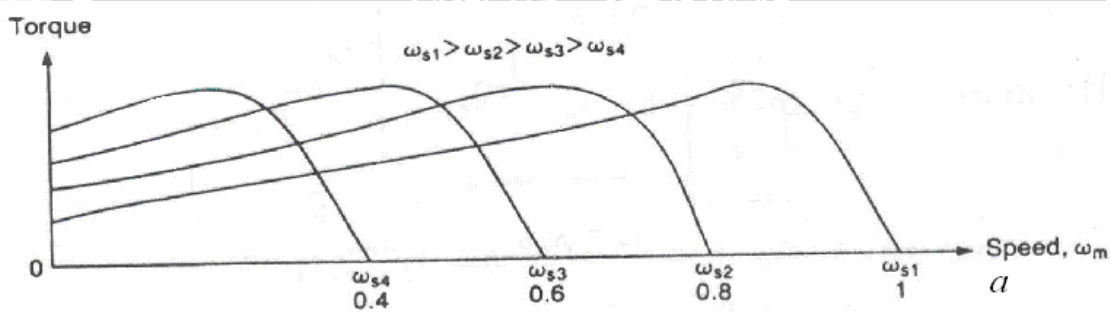
Fluksi celah udara yang konstan pada operasi motor induksi dapat dicapai jika setiap penurunan frekuensi, tegangan stator dinaikkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15. Pengaturan fluksi celah udara konstan biasanya dilakukan secara *loop* tertutup. Pengaturan secara *loop* tertutup ini sangat rumit, karena pengukuran fluksi celah udara sangat sulit dilakukan. Kontrol fluksi celah udara secara tidak langsung dapat dilakukan dengan menjaga rasio V/f konstan, kecuali untuk frekuensi yang rendah rasio V/f dinaikkan untuk mengimbangi jatuh tegangan di resistansi stator.



Gambar 2.15 Penambahan Tegangan Untuk Menjaga Fluksi Magnetisasi Konstan

Sumber: Mohan, Undeland, Robbins, 1989:321

Gambar 2.16 merupakan grafik karakteristik torsi mekanik motor induksi sebagai fungsi dari putaran rotor pada operasi pengaturan tegangan dan frekuensi di bawah nominal. Torsi maksimum pada nilai a yang berbeda akan sama dengan torsi maksimum pada operasi nominal. Pengaturan tegangan dan frekuensi untuk mengatur putaran motor induksi dapat dilakukan dengan menggunakan inverter bermodulasi lebar pulsa. Teknik pengaturan ini lebih populer dibandingkan dengan teknik yang lain di dalam aplikasinya (Mohan, Undeland, P.Robbins, 1989:317).



Gambar 2.16 Kurva Karakteristik Torsi Kecepatan Dengan Kontrol VVVF

Sumber : M.H. Rashid, 1988:359

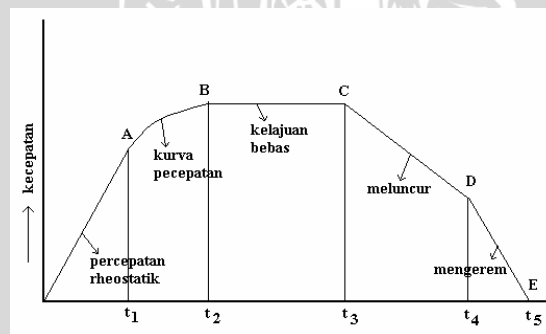
2.4 Pergerakan Kereta Rel Listrik

Pergerakan dari kereta dan energi yang dikonsumsi dapat digambarkan dalam sebuah pola umum berupa kurva kecepatan terhadap waktu seperti pada gambar

2.17. Dalam satu periode perjalanan dari kurva kecepatan terhadap waktu tersebut dapat dibagi dalam lima sub periode berikut:

1. Sub periode pengasutan atau saat mulai bergerak yaitu waktu antara 0 dan t_1 . Selang waktu ini daya dari sistem traksi berubah dari minimum pada saat 0 hingga maksimum pada saat t_1 . Kecepatan kereta secara bertahap naik.
2. Sub periode antara waktu t_1 dan t_2 disebut selang kurva percepatan. Selang sub periode ini daya sistem tetap atau dalam kondisi daya maksimum sehingga kenaikan kecepatan pada selang ini tidak diikuti oleh kenaikan daya sistem, akan tetapi diimbangi oleh penurunan torsi pada poros motor.
3. Sub periode antara waktu t_2 dan t_3 disebut sub periode meluncur. Pada sub periode ini gaya yang ditimbulkan pada roda dari motor traksi sama dengan perlawanan pergerakan kereta sehingga percepatan kereta tersebut nol.
4. Sub periode antara waktu t_3 dan t_4 disebut sub periode menggelincir. Pada sub periode ini gaya tarik percepatan pada roda dihilangkan akan tetapi gaya tarik pengereman belum dikenakan, maka pada saat itu terjadi proses menggelincir.
5. Sub periode antara waktu t_4 dan t_5 adalah sub periode pengereman. Dalam sub periode ini gaya perlambatan mulai dikenakan. Sub periode ini berakhir dengan berhentinya kereta.

(Theraja, 1991:1235-1236)



Gambar 2.17 Kurva Kecepatan Terhadap Waktu Dari Pergerakan Kereta Rel Listrik

Sumber : Theraja, 1991:1236

2.5 Gaya-Gaya Yang Bekerja Pada Kereta Rel Listrik

Gaya tarik (F_t) adalah gaya yang dibangkitkan oleh unit traksi untuk menggerakkan unit kereta rel listrik. Besarnya gaya tarik yang dibutuhkan dirumuskan dengan :

$$F_t = F_a + F_r \quad (2-37)$$

dimana :

F_a = gaya yang dibutuhkan untuk memberikan percepatan linier pada kereta.

F_r = gaya yang dibutuhkan untuk mengatasi tahanan kereta.

Apabila nilai gradien kemiringan permukaan rel diperhitungkan, maka besarnya gaya tarik dirumuskan sebagai :

$$F_t = F_a + F_r + F_g + F_c \quad (2-38)$$

dengan F_g adalah gaya yang dibutuhkan untuk mengatasi gravitasi dan F_c adalah gaya untuk mengatasi tikungan.

2.5.1 Nilai Dari F_a

Jika m adalah massa dari kereta dan a adalah percepatan linier maka, $F_a = ma$. Dengan menganggap massa kereta dalam ton dan percepatan linier KRL dalam km/jam detik, maka persamaan di atas dapat dinyatakan dengan :

$$F_a = (1000 m) \times (1000/3600)a = 277,8 ma \quad (2-39)$$

dengan : F_a = gaya percepatan linier KRL, newton.

m = massa total kereta termasuk penumpang di dalamnya, ton.

a = percepatan linier KRL, km/jam det.

2.5.2 Nilai Dari F_r

Gaya yang dibutuhkan untuk mengatasi tahanan kereta F_r merupakan seluruh gaya yang bekerja melawan arah pergerakan dari kereta. Tahanan kereta yang menyebabkan timbulnya gaya tersebut terdiri dari tahanan mekanik dan tahanan angin. Jika tahanan kereta r dalam newton per ton massa kereta (N/t) dan m dalam ton (t) maka besarnya gaya perlawanan dapat dirumuskan sebagai :

$$F_r = mr \quad (2-40)$$

dengan : F_r = gaya perlawanan KRL, newton

m = massa total KRL termasuk penumpang di dalamnya, ton

r = tahanan spesifik kereta, newton/ton.

Adapun karena ketergantungannya pada bentuk aerodinamik dan kekuatan angin, tahanan ini merupakan fungsi dari kecepatan KRL. Menurut rumus empiris yang ditentukan oleh BN divisionade Bombardier Eurorail, besarnya gaya perlawanan untuk KRL :

$$F_r = 6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2 \quad (2-41)$$

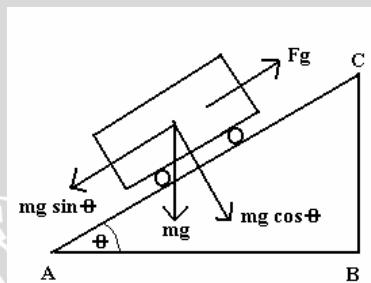
dengan : F_r = gaya perlawanan KRL, newton

v = kecepatan KRL, km/jam

2.5.3 Nilai Dari F_g

Pada saat KRL berjalan naik dengan kemiringan lintasan tertentu, maka akan timbul gaya gravitasi yang melawan gaya pergerakan KRL. Dari gambar di bawah ini dapat dilihat, jika kemiringan rel adalah θ dan massa KRL adalah m , maka besar gaya gravitasi,

$$F_g = W \sin \theta = mg \sin \theta \quad (2-42)$$



Gambar 2.18 Gaya Gravitasi Benda Pada Bidang Miring

Sumber : Theraja, 1991:1242

Dalam aplikasi perkeretaapian, gradien dianggap sebagai kenaikan (dalam meter) untuk setiap jarak rel 100 meter dan dinamakan sebagai persentase gradien yang

$$\text{dirumuskan : } \% G = \frac{BC}{AC/100} = 100 \sin \theta \quad (2-43)$$

Dengan memasukkan nilai dari $\sin \theta$ ke dalam persamaan diatas, diperoleh :

$$F_g = (1000 m)g G/100 = 98 m G \quad (2-44)$$

dengan : F_g = gaya yang dibutuhkan untuk mengatasi gravitasi, newton.

m = massa total KRL termasuk penumpang di dalamnya, ton.

G = gradien kemiringan permukaan rel, %.

2.5.4 Nilai Dari F_c

Gaya ini dibutuhkan sewaktu KRL melintasi tikungan. Besarnya komponen gaya ini adalah :

$$F_c = \frac{700}{R} W = \frac{700}{R} (1000mg) = 6,86 \times 10^6 \frac{m}{R} \quad (2-45)$$

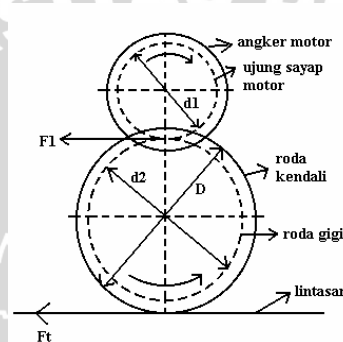
dengan, F_c = komponen gaya untuk mengatasi tikungan, newton.

R = jari-jari kelengkungan lintasan, m.

m = massa total KRL termasuk penumpang di dalamnya, ton.

2.5.5 Mekanisme Pergerakan Kereta

Gaya traksi yang dihasilkan motor traksi dipindahkan ke roda penggerak melalui sistem transmisi roda gigi. Mekanisme transmisi gaya traksi pada roda gigi diperlihatkan oleh gambar 2.19 berikut :



Gambar 2.19 Sistem Transmisi Roda Gigi

Sumber : Theraja, 1991:1246

Dengan menganggap :

T = torsi yang dibangkitkan oleh motor.

F_1 = gaya traksi pada ujung sayap motor.

F_t = gaya traksi pada roda.

γ = rasio gigi.

d_1, d_2 = diameter dari pinion dan gigi roda.

D = diameter dari roda kendali.

η = efisiensi transmisi daya dari motor ke poros roda kendali.

Torsi motor yang disalurkan ke roda melalui gigi adalah :

$$T = F_1 \times d_1 / 2 \text{ atau } F_1 = 2T / d_1 \quad (2-46)$$

Gaya traksi yang disalurkan ke roda gigi adalah :

$$F_t = \eta F_1 \left(\frac{d_2}{D} \right) = \eta \frac{2T}{d_1} \left(\frac{d_2}{D} \right) = \eta T \left(\frac{2}{D} \right) \left(\frac{d_2}{d_1} \right) = 2\gamma \eta \frac{T}{D} \quad (2-47)$$

BAB III

METODOLOGI

Untuk dapat mencapai tujuan penulisan Tugas Akhir ini, perlu adanya suatu metodologi. Metodologi yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan bertujuan untuk mengkaji hal-hal yang berhubungan dengan teori-teori yang mendukung dalam analisis perbandingan sistem pengendali motor traksi KRL, studi literatur dalam penulisan ini disusun sebagai berikut:

1. Mempelajari teori dasar motor DC dan AC, sistem pengendalian VVVF serta Rheostatik serta aplikasinya dalam Kereta Rel Listrik.
2. Mempelajari karakteristik perubahan torsi fungsi putaran dari setiap jenis motor traksi pada kondisi beban berubah-ubah.
3. Penelusuran teoritis gaya-gaya yang bekerja pada rangkaian KRL mulai kondisi pengasutan hingga pengereman.
4. Mempelajari rumusan untuk mencari waktu tempuh, kecepatan, dan percepatan KRL mulai dari kondisi awal sub periode pengasutan, sampai pada kondisi akhir sub periode pengereman dihitung dengan menerapkan gaya-gaya yang dihasilkan oleh motor induksi pada sistem KRL.

3.2 Data

Data yang digunakan adalah data yang diambil dari PT. Kereta Api Unit Balai Yasa Manggarai dan Kantor Unit SK 85 Distrik Jalan Rel Daop VIII, adapun data-data yang dimaksud adalah :

1. Buku Petunjuk Sistem Pengendali VVVF KRL Holec BN dan KRL Rheostatik T6000.
2. Data Teknis KRL VVVF Holec BN dan KRL Rheostatik T6000.
3. Data jalan rel Surabaya-Malang mencakup letak km stasiun yang dilewati, kemiringan dan lengkung rel, tinggi stasiun dari permukaan laut, serta puncak kecepatan yang diizinkan.

3.3 Analisis Data

Setelah data terkumpul maka dilakukan analisis perbandingan sesuai dengan tujuan penelitian, berdasarkan teori dan literatur.

1. Dilakukan analisis data untuk mengetahui prinsip kerja dari masing-masing sistem pengendali KRL dan akan diperoleh karakteristik torsi fungsi putaran dari masing-masing jenis KRL.
2. Dilakukan perhitungan dan analisis data untuk mengetahui gaya-gaya yang bekerja pada rangkaian kereta rel listrik mulai dari kondisi awal sub periode pengasutan sampai kondisi akhir sub periode pengereman pada jalur kereta Malang-Surabaya.
3. Dilakukan perhitungan untuk mencari kecepatan maksimum, waktu tempuh dan percepatan/perlambatan KRL dengan menerapkan gaya-gaya yang dihasilkan motor traksi pada sistem KRL.
4. Studi Perbandingan mencakup aspek-aspek sebagai berikut : membandingkan karakteristik perubahan torsi, kecepatan maksimum yang mampu dicapai, waktu tempuh dan percepatan/perlambatan dari setiap jenis motor traksi pada kondisi beban berubah-ubah.

3.4 Kesimpulan

Tahap berikutnya dari penulisan adalah pengambilan kesimpulan dari hasil analisis perbandingan. Pengambilan kesimpulan ini didasarkan pada kesesuaian antara teori dan praktek.

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Jalur Kereta Surabaya-Malang.

Jalur kereta Surabaya-Malang memiliki panjang total 92,797 km yang membentang dari Stasiun Surabaya Gubeng pada KM 3+475 sampai dengan Stasiun Malang Kota Baru pada KM 49+234. Jalur ini melalui 15 stasiun yakni :

1. Stasiun Surabaya Gubeng (KM 3+475) pada ketinggian 7 meter diatas permukaan laut (dpl).
2. Stasiun Wonokromo.
3. Stasiun Waru.
4. Stasiun Gedangan.
5. Stasiun Sidoarjo.
6. Stasiun Tanggulangin.
7. Stasiun Porong.
8. Stasiun Bangil (KM 47+038 arah Banyuwangi / KM 0+000 arah Malang) pada ketinggian 9 meter dpl.
9. Stasiun Wonokerto (KM 8+759) pada ketinggian 90 meter dpl.
10. Stasiun Sukorejo (KM 16+971) pada ketinggian 239 meter dpl.
11. Stasiun Sengon (KM 21+237) pada ketinggian 312 meter dpl.
12. Stasiun Lawang (KM 31+114) pada ketinggian 491 meter dpl.
13. Stasiun Singosari (KM 39+172) pada ketinggian 487 meter dpl.
14. Stasiun Blimbing (KM 44+946) pada ketinggian 460 meter dpl.
15. Stasiun Malang Kota Baru (KM 49+234) pada ketinggian 444 meter dpl.

Karena keterbatasan kemampuan jalan rel dan juga kondisi jalur yang menurun dari arah Malang menuju Surabaya, maka ada batasan kecepatan yang tidak boleh dilampaui oleh kereta untuk keselamatan penumpang, yakni antara stasiun Malang Kota Baru-stasiun Singosari 80 km/jam, antara stasiun Singosari-stasiun Bangil 50 km/jam, dan antara stasiun Bangil-stasiun Surabaya Gubeng 70 km/jam, sedangkan untuk arah sebaliknya dari Surabaya menuju Malang kereta dapat dipacu sesuai dengan kemampuan maksimumnya dalam menempuh jalur tanjakan.

Kondisi jalur kereta antara stasiun Wonokerto sampai dengan stasiun Sukorejo merupakan kondisi paling berat pada jalur Surabaya-Malang dikarenakan pada jalur ini

kereta akan menaik naik 149 meter dari posisi sebelumnya. Sebagai gambaran kondisi jalur kereta antara Surabaya-Malang, dapat dipergunakan kondisi pada jalur ini dengan mengubah nilai gradien kemiringan dan radius rel berdasarkan variasi yang ada. Berikut ini adalah kondisi jalan rel antara stasiun Wonokerto-stasiun Sukorejo :

- Panjang jalan rel (km) : 8,212.
- Lebar rel (mm) : 1067.
- Variasi gradien kemiringan rel (permil) : 25, 18, 20, 17, 21, 20,5, 19, 10, 23, 20, 18,5, 22.
- Variasi radius kelengkungan rel (m) : 495, 1500, 900, 1000

Lebar rel seluruh jalur kereta api se-pulau Jawa adalah sama, oleh karena itu tidak ada masalah dalam penyediaan fasilitas jalur untuk KRL. Tinggi antara rel dan atap stasiun umumnya sekitar 9,5 meter. KRL VVVF Holec BN dan KRL Rheostatik T6000 mempunyai tinggi dengan keadaan pantograf terbuka maksimum adalah 5,7 meter sehingga masih terdapat ruang sekitar 3,8 meter untuk pembangunan jaringan saluran atas (*catenary*) sebagai sumber daya KRL.

4.2 Perhitungan Berat Total KRL

4.2.1 Perhitungan Berat Total KRL Rheostatik T6000

KRL Rheostatik T6000 mempunyai kapasitas penumpang 150 orang dengan 50 tempat duduk untuk masing-masing TC (*Trailer Car*) dan 170 penumpang dengan 58 tempat duduk untuk masing-masing MC (*Motor Car*). Dalam keadaan kosong tanpa penumpang, KRL mempunyai berat sebagai berikut : TC1 = 37 ton, MC1 = 35 ton, MC2 = 36,5 ton dan TC2 = 35,5 ton.

Dengan asumsi berat masing-masing penumpang adalah 65 kg dan kereta tersusun *single unit* dengan komposisi TC1-MC1-MC2-TC2 maka dapat diketahui berat total kereta sebagai berikut :

- Berat kosong TC1 = 37 ton = 37 ton
- Berat kosong TC2 = 35,5 ton = 35,5 ton
- Berat kosong MC1 = 35 ton = 35 ton
- Berat kosong MC2 = 36,5 ton = 36,5 ton
- Berat penumpang TC1 = $150 \times 0,065$ ton = 9,75 ton
- Berat penumpang TC2 = $150 \times 0,065$ ton = 9,75 ton
- Berat penumpang MC1 = $170 \times 0,065$ ton = 11,05 ton

- Berat penumpang MC2 = $170 \times 0,065 \text{ ton} = 11,05 \text{ ton} +$

Berat total KRL = 185,6 ton

Dalam setiap operasionalnya, untuk mendukung kerja dari rangkaian KRL maka KRL mengambil suplai daya dari jaringan saluran atas (*catenary*) 1500 V DC yang bersumber dari pembangkit listrik PLN. Terdapat 2 komponen utama yang harus dipenuhi kebutuhan dayanya agar rangkaian KRL dapat beroperasi yakni kebutuhan daya maksimum untuk motor traksi (TM) sebesar 100 kW setiap unitnya dan kebutuhan daya maksimum untuk motor generator (MG) 180 kW. Pada KRL jenis ini, baik TC maupun MC dilengkapi oleh traksi motor sehingga total traksi motor yang beroperasi adalah 16 unit.

Setiap satu unit KRL dilengkapi dengan 1 set motor generator tipe CLG-359 sebagai sumber daya untuk batere, instalasi penerangan, instalasi kipas angin dan sistem kontrol KRL lainnya. Motor berfungsi sebagai mesin penggerak mula yang dikopel langsung untuk memutar generator. Daya keluaran dari generator adalah 160 kVA dengan tegangan 200 V. Tegangan keluaran ini dapat divariasikan nilainya dengan menggunakan komponen *Static Inverter* (SIV) tipe SIV-6 yang menghasilkan keluaran 200 V AC, 100 V DC, dan 24 V DC untuk kebutuhan masing-masing komponen bantu KRL.

4.2.2 Perhitungan Berat Total KRL VVVF Holec BN

KRL VVVF Holec BN mempunyai kapasitas penumpang 302 orang dengan 54 tempat duduk untuk masing-masing TC dan 296 orang dengan 76 tempat duduk untuk masing-masing MC. Dalam keadaan kosong tanpa penumpang, kereta TC1 mempunyai berat 33,45 ton, kereta TC2 mempunyai berat 34,1 ton dan kereta MC mempunyai berat 40,68 ton.

Apabila diasumsikan berat masing-masing penumpang 65 kg dan KRL mempunyai komposisi TC1-MC1-MC2-TC2 sehingga berat total KRL adalah :

- Berat kosong TC1 = 33,45 ton = 33,45 ton
- Berat kosong TC2 = 34,1 ton = 34,1 ton
- Berat kosong MC1 = 40,68 ton = 40,68 ton
- Berat kosong MC2 = 40,68 ton = 40,68 ton
- Berat penumpang TC1 = $302 \times 0,065 \text{ ton} = 19,63 \text{ ton}$
- Berat penumpang TC2 = $302 \times 0,065 \text{ ton} = 19,63 \text{ ton}$

- Berat penumpang MC1 = $296 \times 0,065 \text{ ton} = 19,24 \text{ ton}$
 - Berat penumpang MC2 = $296 \times 0,065 \text{ ton} = 19,24 \text{ ton} +$
- Berat total KRL = $226,65 \text{ ton}$

Pada KRL VVVF Holec BN, tidak terdapat Motor Generator, oleh karena itu untuk kebutuhan daya bagi peralatan bantu KRL seperti lampu penerangan dan panel kendali diambil langsung melalui jaringan saluran atas (*catenary*). Untuk penyesuaian tegangan sesuai dengan kebutuhan peralatan bantu KRL digunakan *Static Converter* dengan tegangan masukan 1500 V DC yakni tegangan pada *catenary* dan akan menghasilkan 3 jenis tegangan keluaran yakni 220 V AC 50 Hz, 110 V DC (pada kereta TC1) dan 137 V DC untuk pengisian batere (pada kereta TC2).

4.3 Perhitungan Kinerja Sistem Traksi

Dengan mengetahui kurva kecepatan terhadap waktu dari pergerakan KRL maka waktu tempuh dan nilai percepatan selama perjalanan KRL dapat diketahui.

Gaya tarik motor traksi dalam persamaan 2-38 dapat ditulis sebagai berikut :

$$F_t - (F_r + F_g + F_c) = F_a$$

$$F_t - F_{rgc} = \left(277,8m \frac{dv}{dt} \right) / 1000$$

$$\Delta F(v) = 0,2778 m \frac{dv}{dt}$$

$$\int dt = \int 0,2778 m \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$t = 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \quad (4-1)$$

dengan : m = massa total kereta (ton)

F_t = gaya tarik KRL (kN)

F_{rgc} = beban mekanis (kN)

Diketahuinya nilai F_t dan F_{rgc} dari KRL yang dianalisis maka dapat diperoleh hubungan antara waktu dengan kecepatan.

Jika diperoleh persamaan yang mengandung dua variabel yang dalam hal ini adalah kecepatan (v) dan waktu (t), maka selanjutnya dapat diperoleh nilai percepatan (a).

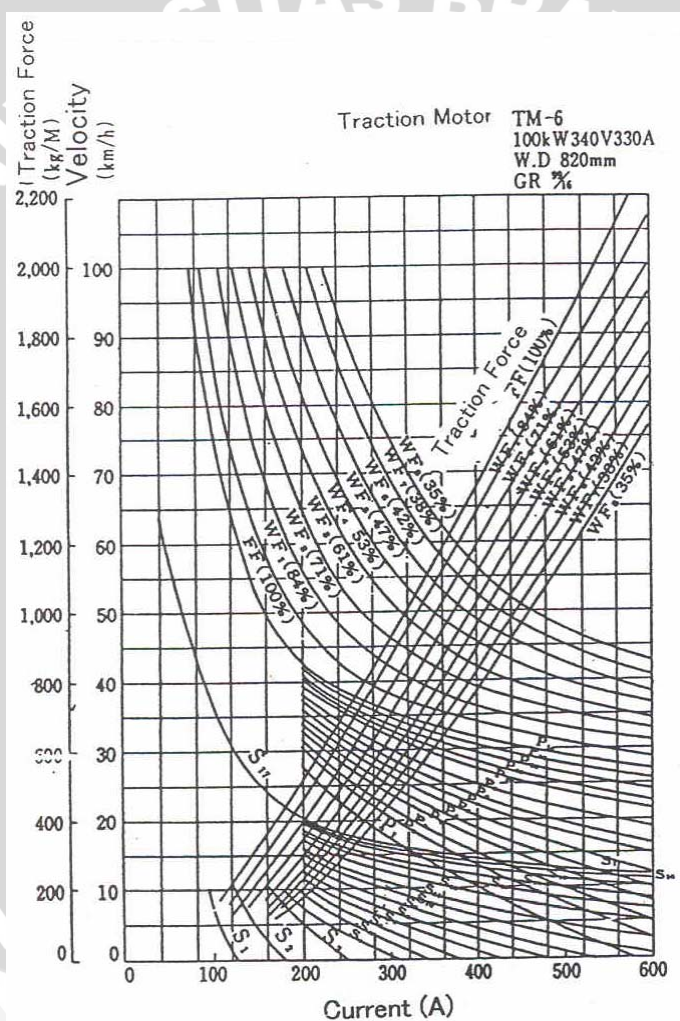
Percepatan didefinisikan sebagai perubahan kecepatan terhadap waktu (Zemansky, 1994:70) :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (4-2)$$

dengan : a = percepatan (km/h/det)

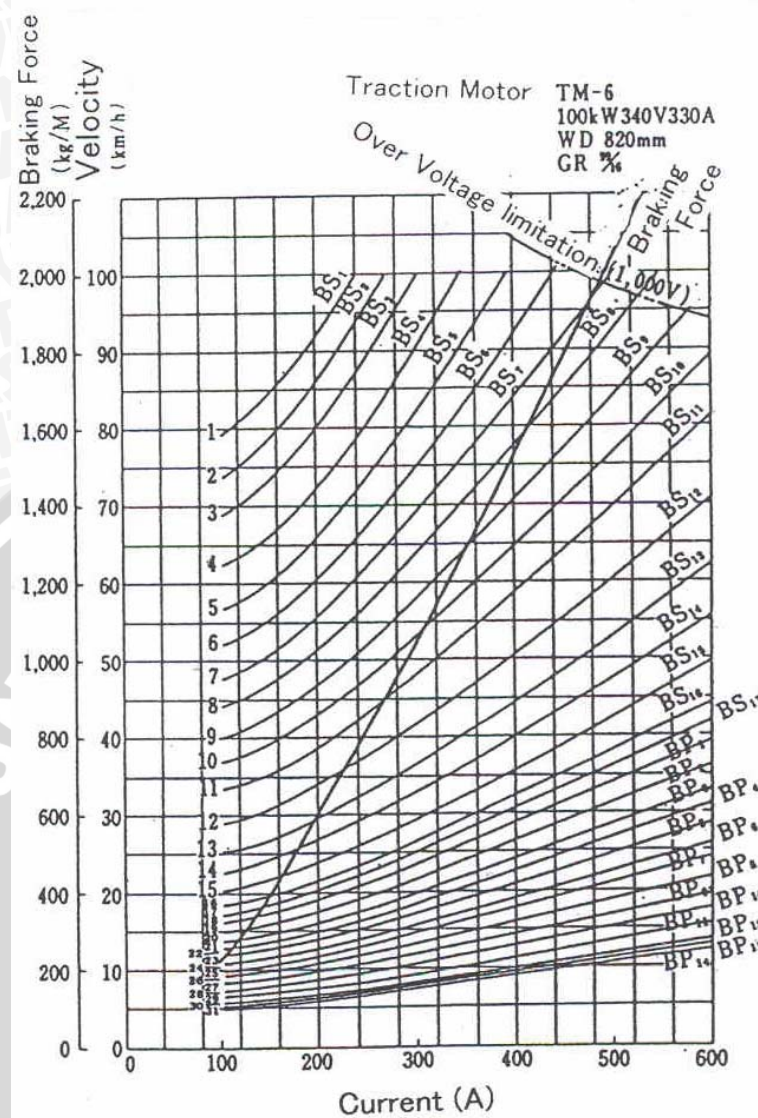
4.4 Analisis Sistem Kendali KRL Rheostatik T6000

Untuk mengetahui pengoperasian KRL dalam satu periode perjalanan dengan kondisi beban yang berubah-ubah adalah berdasarkan gambar 4.1 dan gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.1 Kurva Akselerasi KRL Rheostatik T6000

Sumber : Japan Railway Technical Service Book 1, 1999:26



Gambar 4.2 Kurva Pengereman KRL Rheostatik T6000

Sumber : Japan Railway Technical Service Book 1, 1999:26

Untuk mengatur kecepatan pergerakan KRL dari mulai pengasutan sampai pemberhentian di stasiun berikutnya semuanya dikendalikan oleh suatu alat yakni *Main Controller* dimana kendali alat ini berada di tangan masinis. Pada prinsipnya *main controller* merupakan sebuah sakelar yang menggerakkan kontaktor. Untuk menggerakkan kontaktor tersebut digunakan sebuah motor kecil yang disebut *Pilot Motor*. Pada saat menjalankan kereta, pilot motor ini akan memutar *cam shaft* yang menggerakkan kontaktor untuk mengatur tahanan depan traksi motor, mengatur hubungan seri paralel motor dan mengatur operasi *weaken field* atau pelemahan medan sesuai dengan kurva pergerakan kereta pada gambar 2.13.

Main controller mengendalikan proses pergerakan KRL melalui mekanisme akselerasi dan pengereman bertingkat yang terdiri dari :

- 17 tingkat (*notch*) hubungan motor traksi seri.
- 14 tingkat (*notch*) hubungan motor traksi paralel.
- 8 tingkat (*notch*) pelemahan medan.
- 31 tingkat (*notch*) pengereman dinamik.

Persamaan gerak motor dan beban dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T_m = T_i + j \frac{d\omega}{dt}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_i}{j}$$

dengan :

T_m = Torsi yang dibangkitkan oleh motor

T_i = Torsi beban

j = Inersia pada poros motor

Inersia pada poros motor dirumuskan oleh :

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J_i \cdot \omega_i^2 = \frac{1}{2} \cdot J_i' \cdot \omega_m^2$$

$$J_i' = J_i \left(\frac{\omega_i}{\omega_m} \right)^2$$

Torsi beban (kondisi jalan rel + bobot KRL) :

- Beban mekanis sistem KRL dirumuskan dengan : $F_{rgc} = F_r + F_g + F_c$.
Dengan asumsi jalan rel memiliki gradien kemiringan 0 permil dan tidak ada jalan rel yang berbelok, nilai F_g dan F_c dapat diabaikan sehingga :

$$F_{rgc} = 6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2$$

Untuk sistem traksi KRL Rheostatik T6000, berat KRL adalah 185,6 ton, sehingga persamaan beban mekanis KRL diatas menjadi :

$$\begin{aligned} F_l = F_{rgc} &= (6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2 \\ &= 3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 \end{aligned}$$

- Torsi beban mekanis :

$$T_i = T_{rgc} = \frac{F_l \cdot D}{2 \cdot \gamma \cdot \eta} = \frac{(3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2) \cdot 0,86}{2,99/16,09}$$

$$T_i = 250,722 + 1,968v + 0,0486v^2$$

Percepatan dirumuskan dengan :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_r}{J} = \frac{T_m - (250,722 + 1,968v + 0,0486v^2)}{J_1 \cdot \left(\frac{\omega_r}{\omega_m}\right)^2}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - (250,722 + 1,968v + 0,0486v^2)}{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot \left(\frac{\omega_r}{\omega_m}\right)^2}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - (250,722 + 1,968v + 0,0486v^2)}{92800 \cdot v^2 \cdot \left(\frac{16}{99}\right)^2}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - (250,722 + 1,968v + 0,0486v^2)}{2423,828 \cdot v^2}$$

Untuk menghitung pergerakan KRL Rheostatik T6000 sejak proses pengasutan sampai kecepatan maksimal, dengan mempergunakan data pada tabel 4.1 dan tabel 4.2, dapat dipergunakan rumusan diatas yakni :

➤ Hubungan Motor Traksi Seri :

- Notch S1

$$\alpha = \frac{1470 - (250,722 + 1,968(2,78) + 0,0486(2,78)^2)}{2423,828 \cdot (2,78)^2} = 0,065 \text{ m/s}^2$$

- Notch S2

$$\alpha = \frac{2156 - (250,722 + 1,968(3,06) + 0,0486(3,06)^2)}{2423,828 \cdot (3,06)^2} = 0,0837 \text{ m/s}^2$$

- Notch S3

$$\alpha = \frac{3528 - (250,722 + 1,968(3,06) + 0,0486(3,06)^2)}{2423,828 \cdot (3,06)^2} = 0,144 \text{ m/s}^2$$

- Notch S4

$$\alpha = \frac{4410 - (250,722 + 1,968(3,06) + 0,0486(3,06)^2)}{2423,828 \cdot (3,06)^2} = 0,183 \text{ m/s}^2$$

- Notch S5

$$\alpha = \frac{4802 - (250,722 + 1,968(3,06) + 0,0486(3,06)^2)}{2423,828 \cdot (3,06)^2} = 0,2 \text{ m/s}^2$$

- Notch S6

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(3,06) + 0,0486(3,06)^2)}{2423,828 \cdot (3,06)^2} = 0,213 \text{ m/s}^2$$

- Notch S7

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(3,33) + 0,0486(3,33)^2)}{2423,828 \cdot (3,33)^2} = 0,18 \text{ m/s}^2$$

- Notch S8

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(3,61) + 0,0486(3,61)^2)}{2423,828 \cdot (3,61)^2} = 0,153 \text{ m/s}^2$$

- Notch S9

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(3,89) + 0,0486(3,89)^2)}{2423,828 \cdot (3,89)^2} = 0,132 \text{ m/s}^2$$

- Notch S10

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(4,167) + 0,0486(4,167)^2)}{2423,828 \cdot (4,167)^2} = 0,115 \text{ m/s}^2$$

- Notch S11

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(4,44) + 0,0486(4,44)^2)}{2423,828 \cdot (4,44)^2} = 0,101 \text{ m/s}^2$$

- Notch S12

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(4,72) + 0,0486(4,72)^2)}{2423,828 \cdot (4,72)^2} = 0,089 \text{ m/s}^2$$

- Notch S13

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(4,72) + 0,0486(4,72)^2)}{2423,828 \cdot (4,72)^2} = 0,089 \text{ m/s}^2$$

- Notch S14

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(4,72) + 0,0486(4,72)^2)}{2423,828 \cdot (4,72)^2} = 0,089 \text{ m/s}^2$$

- Notch S15

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(4,72) + 0,0486(4,72)^2)}{2423,828 \cdot (4,72)^2} = 0,089 \text{ m/s}^2$$

- Notch S16

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(5,56) + 0,0486(5,56)^2)}{2423,828 \cdot (5,56)^2} = 0,064 \text{ m/s}^2$$

- Notch S17

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(17,78) + 0,0486(17,78)^2)}{2423,828 \cdot (17,78)^2} = 0,0063 \text{ m/s}^2$$

➤ Hubungan Motor Traksi Paralel :

- Notch P1

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(7,64) + 0,0486(7,64)^2)}{2423,828 \cdot (7,64)^2} = 0,034 \text{ m/s}^2$$

- Notch P2

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(8,33) + 0,0486(8,33)^2)}{2423,828 \cdot (8,33)^2} = 0,029 \text{ m/s}^2$$

- Notch P3

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(8,61) + 0,0486(8,61)^2)}{2423,828 \cdot (8,61)^2} = 0,027 \text{ m/s}^2$$

- Notch P4

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(8,89) + 0,0486(8,89)^2)}{2423,828 \cdot (8,89)^2} = 0,025 \text{ m/s}^2$$

- Notch P5

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(9,44) + 0,0486(9,44)^2)}{2423,828 \cdot (9,44)^2} = 0,022 \text{ m/s}^2$$

- Notch P6

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(9,72) + 0,0486(9,72)^2)}{2423,828 \cdot (9,72)^2} = 0,021 \text{ m/s}^2$$

- Notch P7

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(10) + 0,0486(10)^2)}{2423,828 \cdot (10)^2} = 0,0199 \text{ m/s}^2$$

- Notch P8

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(10,28) + 0,0486(10,28)^2)}{2423,828 \cdot (10,28)^2} = 0,0188 \text{ m/s}^2$$

- Notch P9

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(10,56) + 0,0486(10,56)^2)}{2423,828 \cdot (10,56)^2} = 0,0178 \text{ m/s}^2$$

- Notch P10

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(10,83) + 0,0486(10,83)^2)}{2423,828 \cdot (10,83)^2} = 0,0169 \text{ m/s}^2$$

- Notch P11

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(11,11) + 0,0486(11,11)^2)}{2423,828 \cdot (11,11)^2} = 0,0161 \text{ m/s}^2$$

- Notch P12

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(11,11) + 0,0486(11,11)^2)}{2423,828 \cdot (11,11)^2} = 0,0161 \text{ m/s}^2$$

- Notch P13

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(11,67) + 0,0486(11,67)^2)}{2423,828 \cdot (11,67)^2} = 0,0146 \text{ m/s}^2$$

- Notch P14

$$\alpha = \frac{5096 - (250,722 + 1,968(27,78) + 0,0486(27,78)^2)}{2423,828 \cdot (27,78)^2} = 0,0025 \text{ m/s}^2$$

Berikut ini adalah proses pergerakan kereta berdasarkan gambar 2.17.

4.4.1 Sub Periode Pengasutan

Pada proses pengasutan ini, berlaku pengaturan hubungan seri-paralel dengan melalui 31 tingkat (*notch*). Berdasarkan kurva akselerasi pada gambar 4.1 dan kurva *powering* pada Maintenance Instruction Vol 3 (Nippon Sharyo Seizo Kaisha Ltd, 1985), pengaturan tersebut menghasilkan kinerja motor traksi pada kondisi beban nominal dengan penguatan medan 100% seperti pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

Pada sub periode pengasutan ini secara bertahap tingkatan *notch* dirubah dimulai dengan menghubungkan seri seluruh motor traksi dengan tahanan depan yang nilainya 8,028 Ω . Nilai tahanan yang besar ini menyebabkan arus pengasutan tidak terlampaui tinggi yakni sekitar 90,9 A atau sekitar $\frac{1}{3}$ dari arus nominal, namun sesuai dengan persamaan 2.4, dimana nilai dari torsi sebanding dengan arus maka torsi yang mampu dibangkitkan oleh motor dalam keadaan berbeban hanya 150 kg/m.

Tabel 4.1 Kinerja Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Dalam Keadaan Berbeban Pada Sub Periode Pengasutan Dengan Hubungan Motor Traksi Seri dan Penguatan Medan 100%.

Notch	Tahanan Mula (Ω) pada suhu 170° C	Kecepatan (km/h)		Torsi (kg/m)		Arus Jangkar (A)
		Maks	Min	Maks	Min	
S1	8,028	10	0	200	150	90,9-127,27
S2	5,332	11	0	400	220	118,18-181,82
S3	4,044	11	0	700	360	159,09-250
S4	3,245	11	0	970	450	181,82-309,09
S5	2,519	11	0	1100	490	190,9-345,45
S6	2,003	11	0	1280	520	200-381,82
S7	1,602	12	0	1450	520	200-427,27
S8	1,193	13	0	1710	520	200-481,82
S9	0,990	14	0	1960	520	200-536,36
S10	0,536	15	0	2200	520	200-577,27
S11	0,245	16	0	2200	520	200-600
S12	0	17	2,5	2200	520	200-600
S13	0	18	5	2200	520	200-600
S14	0	18	7	2200	520	200-600
S15	0	18	7,5	2200	520	200-600
S16	0	20	10	2200	520	200-600
S17	0	64	12,5	2200	520	40,91-600

Sumber : Japan Railway Technical Service Book 1, 1999:26

Tabel 4.2 Kinerja Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Dalam Keadaan Berbeban Pada Sub Periode Pengasutan Dengan Hubungan Motor Traksi Paralel dan Penguatan Medan 100%.

Notch	Tahanan Mula (Ω) pada suhu 170° C	Kecepatan (km/h)		Torsi (kg/m)		Arus Jangkar (A)
		Maks	Min	Maks	Min	
P1	1,948	27,5	0	2200	520	200-600
P2	1,413	30	2,5	2200	520	200-600
P3	1,413	31	5	2200	520	200-600
P4	0,986	32	7,5	2200	520	200-600
P5	0,986	34	10	2200	520	200-600
P6	0,642	35	12	2200	520	200-600
P7	0,642	36	15	2200	520	200-600
P8	0,336	37	17	2200	520	200-600
P9	0,336	38	19	2200	520	200-600
P10	0,122	39	22	2200	520	200-600
P11	0,122	40	23	2200	520	200-600
P12	0	40	24	2200	520	200-600
P13	0	42	26	2200	520	200-600
P14	0	100	28	2200	520	72,72-600

Sumber : Japan Railway Technical Service Book 1, 1999:26

Pada tabel 4.1 dapat dilihat bahwa *notch* S1-S11 tidak berfungsi untuk menaikkan kecepatan KRL karena hanya menaikkan nilai kecepatan sedikit, namun *notch* ini mempunyai peranan utama untuk memperkecil arus pengasutan dengan bantuan tahanan depan yang nilainya berkurang sedikit demi sedikit hingga akhirnya mencapai nilai nol. Adapun dengan berkurangnya nilai tahanan depan, maka nilai arus pengasutan akan naik sampai mencapai nilai maksimum. Hal ini mempengaruhi nilai torsi yang mampu dibangkitkan oleh sistem yang perlahan naik sebanding dengan kenaikan nilai arus. Pada saat *notch* S12-S17 tahanan depan telah mencapai nilai nol, sehingga arus yang mengalir maksimum, oleh karena itu torsi yang dibangkitkan mencapai nilai maksimum. KRL mulai berakselerasi meningkatkan kecepatannya hingga mencapai nilai 20 km/jam seperti terlihat pada gambar 4.1.

Untuk meningkatkan kecepatan laju KRL maka hubungan motor traksi dirubah menjadi paralel dengan cara setiap 4 buah motor traksi yang terhubung seri permanen diparalel dengan 4 buah motor traksi lainnya yang juga terhubung seri permanen sehingga didapatkan tegangan masukan pada 4 buah motor traksi tersebut sama dengan tegangan jala-jala 1500 V DC.

Sesuai dengan persamaan 2.5 dengan meningkatnya nilai tegangan masukan yang sebelumnya hanya $\frac{1}{2}$ dari tegangan masukan ketika motor traksi terhubung seri,

maka arus yang mengalir ke motor pun akan meningkat. Dengan meningkatnya arus maka nilai fluks pun meningkat sehingga kecepatan KRL dapat meningkat pula dimana pada posisi notch P1 kecepatan KRL mencapai 27,5 km/h. Untuk menghindari meningkatnya arus secara tiba-tiba ketika terjadi perubahan hubungan dari seri menjadi paralel maka dipasang tahanan awal dengan nilai 1,948 Ω . Dapat dilihat pada tabel 4.2 bahwa dengan hubungan paralel ini, kecepatan KRL meningkat cepat dari 27,5 km/h sampai mencapai 100 km/h dengan torsi yang naik sedikit untuk setiap perubahan notch. Pada sub periode pengasutan ini, hal terpenting yang harus dilakukan adalah bagaimana agar KRL mampu memiliki torsi yang cukup besar untuk bergerak dari keadaan diam sampai akhirnya mencapai kecepatan tertentu untuk berakselerasi. Kondisi akhir dari sistem seri-paralel ini menghasilkan torsi maksimum 2200 kg/m yang diharuskan mampu untuk memikul beban KRL pada kondisi tanjakan maksimum dengan kemiringan 25 permil pada jalur rel Surabaya-Malang seperti yang terdapat pada stasiun Wonokerto.

Adanya pemasangan tahanan mula mampu menghasilkan kinerja KRL yang halus, karena kecepatan meningkat perlahan sesuai dengan tingkat *notch* yang digunakan. Apabila pelayanan yang dilakukan oleh masinis melalui handel *main controller* langsung pada posisi paralel pelemahan medan, hal ini tidak akan mempengaruhi terhadap pemberian arus pada traksi motor, sebab proses perubahan tingkat hubungan resistor secara otomatis dikendalikan oleh perangkat *Current Limit Magnetic Amplifier*. Pada tiap akhir hubungan traksi motor ditandai dengan menyalnya lampu tanda akhir kedudukan.

Untuk merumuskan persamaan beban KRL Rheostatik T6000 pada kondisi normal dalam arti tidak terdapat jalur yang menanjak pada kondisi pengasutan maka diperlukan beberapa asumsi awal sebagai berikut :

- KRL terdiri dari satu set yang terdiri dari TC1-MC1-MC2-TC2 dengan berat total 185,6 ton.
- KRL bergerak pada jalan rel lurus dengan gradien kemiringan 0 permil.
- Adanya jalur rel yang berbelok hanya pada beberapa titik jalur sehingga kondisi ini dapat diabaikan.

Beban mekanis untuk pengasutan pada sistem traksi dapat diperoleh dengan menjumlahkan persamaan 2-41, persamaan 2-44 dan persamaan 2-45 sebagai berikut :

$$F_{rgc} = F_r + F_g + F_c,$$

Namun dengan asumsi diatas maka F_c dan F_g tidak ada sehingga :

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2)/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2)/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2)/1000 \\
 &= 3,247 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \quad (4-3)
 \end{aligned}$$

Sistem *main controller* mengendalikan perubahan hubungan setiap 8 buah motor traksi, karena pada tipe Rheostatik T6000 ini terdapat 16 buah motor traksi maka torsi yang mampu dibangkitkan adalah 2 kali lipat torsi maksimum yang terdapat pada tabel 4.2. Gaya tarik percepatan pada saat pengasutan dapat diperoleh dengan menggunakan torsi maksimum yang dapat dibangkitkan oleh sistem seri-paralel pada posisi P14 yakni 2200 kg/m dan mengasumsikan efisiensi transmisi daya 0,9 kemudian memasukkannya ke persamaan 2-47 sehingga diperoleh :

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN} \quad (4-4)$$

Dengan memasukkan persamaan 4-3 dan persamaan 4-4 ke dalam persamaan 4-1 didapatkan waktu tempuh KRL dalam sub periode pengasutan :

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{555,182 - 0,02549v - 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{-v^2 - 40,4603v + 881241,27} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(918,732 - v)(v + 959,193)} \\
 &= 43,581 \int \left(\frac{1}{918,732 - v} + \frac{1}{v + 959,193} \right) dv \\
 &= 43,581 (-\ln|918,732 - v| + \ln|v + 959,193|) + C \\
 &= 43,581 \ln \left| \frac{959,193 + v}{918,732 - v} \right| + C \quad (4-5)
 \end{aligned}$$

Proses pengasutan dimulai sejak KRL berhenti sampai mencapai kecepatan tertentu. Nilai kecepatan yang mampu dihasilkan berbanding terbalik dengan torsi yang dibangkitkan, semakin tinggi torsi yang dibangkitkan maka kecepatan yang mampu

dicapai semakin rendah. Dengan membangkitkan torsi maksimum 2200 kg/m pada posisi P14 maka berdasarkan tabel 4.2 kecepatan akhir yang dicapai adalah 28 km/h. Diasumsikan kecepatan perubahan *notch* tetap maka dengan memasukkan nilai kecepatan sebagai batas integrasi ke dalam persamaan 4-5, waktu tempuh KRL dalam sub periode pengasutan adalah :

$$t = 43,581 \ln \left| \frac{959,193 + v}{918,732 - v} \right|^{28}$$

$$= 43,581 (0,103 - 0,043)$$

$$= 43,581 (0,06)$$

$$t = 2,615 \text{ detik}$$

Untuk menghitung percepatan dapat mempergunakan persamaan 4-2 sebagai berikut :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{2,615} = 10,707 \text{ km/h/det}$$

Pada kondisi seperti yang diasumsikan, KRL Rheostatik T6000 akan melakukan proses pengasutan dalam waktu 2,615 detik untuk mencapai kecepatan dari nol sampai 28 km/jam dengan percepatan sebesar 10,707 km/jam/det.

Jalur kereta Surabaya-Malang memiliki beberapa variasi gradien kemiringan rel. Untuk mengetahui kemampuan KRL Rheostatik T6000 dalam melakukan operasi pengasutan pada berbagai kondisi gradien kemiringan rel dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Pengasutan

Gradien Kemiringan (%)	Waktu Tempuh (detik)	Akselerasi (km/h/det)
0	2,615	10,707
2,5	2,82	9,929
5	3,098	9,038
7,5	3,412	8,206
10	3,826	7,318
12,5	4,423	6,331
15	5,132	5,456
17,5	6,136	4,563
20	7,538	3,715
22,5	9,939	2,817
25	14,43	1,94

Sumber : Perhitungan

Dengan melihat tabel 4.3, dapat diketahui bahwa semakin miring jalur rel maka waktu tempuh akan semakin lambat dan akselerasi KRL akan semakin rendah, hal ini karena adanya pengaruh gaya gravitasi yang timbul akibat miringnya jalan rel, dimana selain untuk menggerakkan beban kereta dari keadaan diam pada waktu pengasutan, motor pun harus mampu melawan gaya gravitasi tersebut.

Pada stasiun Wonokerto, KRL diharuskan melakukan pengasutan pada kondisi stasiun dengan gradien kemiringan rel 25 permil, dan gradien kemiringan rel ini adalah yang tertinggi dibandingkan pada stasiun lainnya sepanjang jalur Surabaya-Malang. Berdasarkan tabel 4.3 ternyata dengan komposisi KRL *single unit* pun, KRL Rheostatik T6000 mampu untuk beroperasi pada jalur ini, dengan waktu tempuh selama pengasutan 14,43 detik dan akselerasi 1,94 km/jam/detik.

4.4.2 Sub Periode Percepatan

Ketika motor telah terhubung paralel penuh tanpa adanya penyisipan tahanan mula, maka untuk lebih meningkatkan kecepatan KRL disisipkan tahanan variabel yang diparalel dengan kumparan medan, sehingga arus medan dan fluksinya dapat diatur nilainya yang dinamakan dengan operasi *weaken field*. Cara ini sangat sederhana dan murah, selain itu rugi panas yang ditimbulkan kecil pengaruhnya. Karena besarnya fluksi yang bisa dicapai oleh kumparan medan terbatas, kecepatan yang dapat diatur pun terbatas.

Dengan mengurangi nilai resistansi belitan medan, maka fluksi yang dibangkitkan pun akan berkurang nilainya sehingga nilai arus medan yang mengalir pun akan berkurang. Sesuai dengan persamaan 2-6 dimana nilai arus jangkar berbanding terbalik dengan putaran, maka pada motor seri dimana nilai arus jangkar sama dengan nilai arus medan, dengan berkurangnya nilai arus medan maka kecepatan KRL akan bertambah cepat. Pelemahan medan maksimum diperoleh dengan 35% dari nilai medan nominal.

Adanya pelemahan fluksi berpengaruh terhadap kurva karakteristik dimana kurva kecepatan fungsi arus jangkar dan kurva torsi fungsi arus jangkar akan bergeser ke kanan. Semakin diperlemah nilai medannya maka kedua kurva karakteristik akan bergeser makin ke kanan seperti yang terlihat pada gambar 4.1.

Tabel 4.4 Kinerja Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Dalam Keadaan Berbeban
Pada Sub Periode Percepatan Dengan Operasi Kendali *Weaken Field*.

Notch	Penguatan Medan (%)	Kecepatan (km/h)		Torsi (kg/m)		Arus Jangkar (A)
		Maks	Min	Maks	Min	
WF1	84%	100	28,5	2120	60	100-600
WF2	71%	100	31	2000	80	109,09-600
WF3	61%	100	33	1920	120	118,18-600
WF4	53%	100	34	1820	160	136,36-600
WF5	47%	100	37	1730	200	150-600
WF6	42%	100	38	1680	220	181,82-600
WF7	38%	100	41	1600	220	209,09-600
WF8	35%	100	43	1550	220	227,27-600

Sumber : Japan Railway Technical Service Book 1, 1999:26

Dapat dilihat pada tabel 4.4, bahwa dengan operasi *weaken field* ini, kecepatan minimum yang mampu dibangkitkan oleh sistem pada setiap *notch*-nya dapat ditingkatkan namun hal ini berpengaruh terhadap torsi yang dibangkitkan dimana dengan meningkatnya nilai kecepatan, torsi maksimum yang mampu dibangkitkan akan turun.

Pada sub periode percepatan, sistem sudah mencapai daya nominal namun masih menaikkan kecepatan. Diasumsikan kondisi terakhir KRL beroperasi adalah pada notch WF8. Berdasarkan kurva karakteristik pada gambar 4.1 terlihat bahwa KRL masih dapat dipacu lagi sampai mencapai kecepatan 100 km/h. Pengaturan tersebut menghasilkan kinerja motor traksi seperti pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Karakteristik Pengaturan Motor Traksi KRL Rheostatik T6000
Pada Sub Periode Percepatan Dengan Operasi Weaken Field 35%.

Arus Medan (A)	227,27	250	300	350	400	450	500	550	600
Kecepatan (km/h)	100	91	75	64,5	57	50	46,5	44	42,5
Torsi (kg/m)	240	300	460	550	770	1000	1220	1300	1520

Sumber : Japan Railway Technical Service Book 1, 1999:26

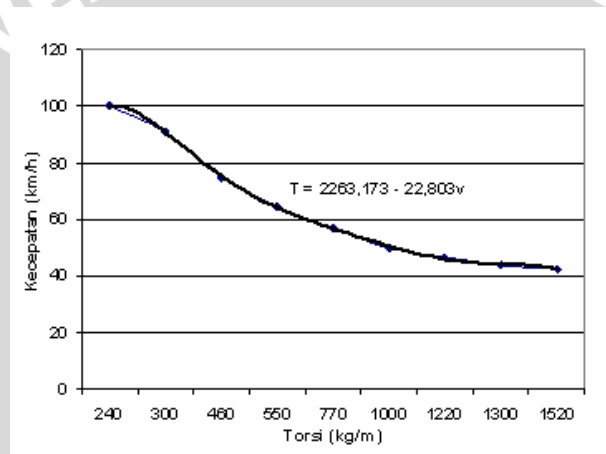
Karena sistem sudah mencapai daya nominal, maka untuk mengetahui hubungan antara daya, kecepatan dan torsi dari KRL dapat menggunakan rumusan sebagai berikut (Zemansky, 1994:231) :

$$P = T\omega$$

dengan : T = torsi KRL
 P = daya total motor traksi.
 ω = kecepatan sudut.

Dengan nilai daya konstan, maka dengan persamaan diatas akan diperoleh persamaan torsi fungsi kecepatan. Untuk memudahkan perumusan persamaan tersebut, maka data pada tabel 4.4 diatas digambarkan ke dalam sebuah grafik seperti yang terlihat pada gambar 4.3 dibawah ini dan melalui metode pendekatan karakteristik grafik dengan bantuan program Microsoft Excel akan diperoleh persamaan torsi fungsi kecepatan sebagai berikut :

$$T = 2263,173 - 22,803v \quad (4-7)$$



Gambar 4.3 Grafik Karakteristik Torsi Fungsi Kecepatan KRL Rheostatik T6000
 Pada Sub Periode Percepatan.
 Sumber : Analisis Data

Nilai dari gaya tarik KRL diperoleh dengan memasukkan persamaan 4-7 ke dalam persamaan 2-47 sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\ &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\ &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\ &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\ &= 574,463 - 5,788v \text{ kN} \end{aligned} \quad (4-8)$$

Untuk sub periode percepatan, dengan asumsi yang sama dengan sub periode pengasutan, maka persamaan beban KRL adalah sama dengan persamaan 4-3 yakni :

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2)/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2)/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2)/1000 \\
 &= 3,247 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 4-8 dan persamaan 4-3 ke dalam persamaan 4-1 diperoleh :

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{571,216 - 5,813v - 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9226,984v + 906692,064} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,302 dv}{(97,24 - v)(9324,224 + v)} \\
 &= 8,687 \int \left(\frac{1}{97,24 - v} + \frac{1}{9324,224 + v} \right) dv \\
 &= 8,687 (-\ln|97,24 - v| + \ln|9324,224 + v|) + C \\
 &= 8,687 \ln \left| \frac{9324,224 + v}{97,24 - v} \right| + C \tag{4-9}
 \end{aligned}$$

Sub periode percepatan dimulai pada saat KRL melakukan operasi *weaken field*. Seberapa besar nilai pelemahan medan bergantung pada beban yang dipikul KRL, semakin berat bebannya maka operasi pelemahan medan hanya dapat dilakukan pada notch *weaken field* tertentu. Batas torsi maksimum yang mampu dibangkitkan pada setiap notch operasi *weaken field* dapat dilihat pada tabel 4.4.

Besar atau kecilnya nilai kecepatan maksimum yang mampu dicapai KRL dengan beban tertentu dapat dilihat pada persamaan 4-9, dimana konstanta dari $(97,24 - v)$ yakni 97,24 menunjukkan batas kecepatan maksimum yang mampu dicapai KRL. Diambil nilai kecepatan maksimum yang dicapai 97 km/h sehingga range kecepatan KRL pada sub periode ini adalah antara 28 – 97 km/h. Apabila range kecepatan ini dimasukkan ke dalam persamaan 4-9 sebagai batas integrasi maka diperoleh :

$$\begin{aligned}
 t &= 8,687 \ln \left| \frac{9324,224 + v}{97,24 - v} \right|_{28}^{97} \\
 &= 8,687 (10,578 - 4,906) \\
 &= 8,687 (5,672) \\
 &= 49,273 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

Untuk menghitung percepatan dapat menggunakan persamaan 4-2 sebagai berikut :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{97 - 28}{49,273} = 1,4 \text{ km/h/det}$$

Sub periode percepatan memiliki karakteristik kecepatan yang berbanding terbalik dengan torsi sesuai dengan gambar 4.3 pada kondisi daya konstan. Berdasarkan gambar 4.1 dan tabel 4.4 dapat diketahui bahwa tanpa melakukan operasi pelemahan medan pun KRL tetap akan mencapai kecepatan maksimum 100 km/h, hanya saja disini dapat terlihat, bahwa apabila KRL membawa beban yang berat, maka tentunya dibutuhkan torsi yang tinggi, adanya kebutuhan torsi yang tinggi menyebabkan KRL tidak akan mampu mencapai kecepatan maksimal tersebut. Dengan operasi pelemahan medan maka dengan torsi yang sama akan diperoleh kecepatan yang lebih tinggi dari kecepatan yang mampu diperoleh KRL apabila dioperasikan pada mode medan penuh.

Tabel 4.6 Pengaruh Kemiringan Terhadap Kecepatan Maksimum KRL Rheostatik T6000
Pada Sub Periode Percepatan Dengan Kondisi Penguatan Medan 35%

Gradien Kemiringan (%)	Kecepatan Maksimum (km/h)
0	97,24
2,5	89,573
5	78,058
7,5	74,201
10	66,496
12,5	58,778
15	51,048
17,5	43,305
20	35,549
22,5	27,779
25	19,997

Sumber : Perhitungan

Kondisi *notch* WF8 dengan beban nominal menghasilkan waktu tempuh 49,723 detik untuk mencapai kecepatan maksimum KRL 97 km/h dan akselerasi 1,4 km/h/detik. Untuk mengetahui pengaruh kemiringan terhadap kecepatan maksimum yang mampu dicapai KRL pada kondisi *notch* WF8 dapat dilakukan dengan mencari persamaan seperti yang dilakukan untuk mencari persamaan 4-9 dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.6.

Dari tabel 4.6 dapat dilihat bahwa pada saat KRL melewati jalan rel dengan gradien kemiringan lebih dari 22,5 permil maka KRL tidak akan melakukan proses percepatan melainkan perlambatan karena kecepatan maksimal yang mampu dicapai dibawah nilai kecepatan puncak proses pengasutan, artinya secara bertahap KRL akan mengurangi kecepatan karena beban yang harus ditarik diatas batas kemampuan KRL. Namun tentunya hal ini tidak perlu dipersoalkan mengingat adanya jalur rel dengan gradien kemiringan diatas 22,5 permil hanya pada titik-titik tertentu saja.

Untuk mengetahui pengaruh kemiringan jalur rel terhadap waktu tempuh dan akselerasi KRL dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Percepatan Dengan Kondisi Penguatan Medan 35%

Gradien Kemiringan (%)	Kecepatan Maksimum (km/h)	Waktu Tempuh (detik)	Akselerasi (km/jam/det)
0	97,24	49,723	1,393
2,5	89,573	48,325	1,269
5	78,058	46,593	1,069
7,5	74,201	45,958	1
10	66,496	44,428	0,861
12,5	58,778	42,546	0,718
15	51,048	39,884	0,572
17,5	43,305	36,528	0,412
20	35,549	30,367	0,241

Sumber : Perhitungan

Dari tabel 4.7 dapat dilihat bahwa kemiringan jalan rel berdampak terhadap kemampuan akselerasi KRL, dimana semakin tinggi gradien kemiringan maka akselerasi KRL akan semakin rendah. Untuk kondisi gradien kemiringan diatas 22,5 permil tidak dilakukan perhitungan karena berdasarkan tabel 4.6 kecepatan maksimal

KRL untuk kondisi tersebut dibawah kecepatan puncak kondisi pengasutan sehingga KRL akan mengalami proses perlambatan. Hal ini dikarenakan torsi maksimum yang mampu dicapai KRL dengan kondisi penguatan medan 35% lebih rendah daripada torsi maksimum yang mampu dicapai oleh KRL dengan kondisi penguatan medan 100% seperti terlihat pada gambar 4.1 sehingga untuk mensiasati adanya proses perlambatan untuk kondisi jalan rel dengan kemiringan diatas 22,5 permil dapat dilakukan dengan menurunkan *notch* pada posisi dibawah WF8.

4.4.3 Sub Periode Meluncur

Sub periode meluncur terjadi pada saat tidak ada penambahan kecepatan pada KRL. Dengan demikian kecepatan KRL konstan, sehingga didapatkan nilai percepatan $a = 0$. KRL akan melakukan proses meluncur ini selama perjalanan sampai tiba saat mendekati stasiun tujuan untuk kemudian melakukan proses perlambatan.

4.4.4 Sub Periode Perlambatan

Dengan kecepatan meluncur tertentu, masinis yang telah mengenal baik jalur rel yang dilaluinya akan mengetahui kapan saatnya melakukan proses pengereman. Untuk mengurangi laju KRL secara bertahap sebelum diterapkan rem mekanik, *main controller* akan menerapkan sistem pengereman dinamik dimana tegangan jala-jala 1500 V DC akan dihilangkan dan diganti dengan tahanan mula, sehingga motor akan bekerja sebagai generator dan mengalirkan arus ke tahanan mula tersebut.

Pengereman tersebut dilakukan bertahap dengan 31 tingkat *notch* pengereman. Berdasarkan kurva pengereman pada gambar 4.2 dan kurva *dynamic braking* pada Maintenance Instruction Vol 3 (Nippon Sharyo Seizo Kaisha Ltd, 1985), pengaturan tersebut menghasilkan kinerja motor traksi pada kondisi beban nominal seperti pada tabel 4.8.

Pada sub periode perlambatan ini, pertama kali dioperasikan *notch* B1. Tahanan mula dipasang dengan nilai maksimum 10,462 Ω . Pemberian tahanan yang nilainya besar ini bertujuan agar nilai arus jangkar tidak terlampau besar, karena energi putaran KRL yang masih cukup besar dengan arus jangkar yang tinggi apabila diberi tahanan yang nilainya rendah dapat merusak peralatan *main controller* itu sendiri.

Tabel 4.8 Kinerja Motor Traksi KRL Rheostatik T6000 Dalam Keadaan Berbeban
Pada Sub Periode Perlambatan

Notch	Tahanan Mula (Ω) pada suhu 170° C	Kecepatan (km/h)		Torsi Pengeraman (kg/m)		Arus Jangkar (A)
		Maks	Min	Maks	Min	
B1	10,462	100	80	800	220	100-230
B2	7,772	100	74	900	220	100-270
B3	6,478	100	69	1080	220	100-300
B4	5,679	100	63	1290	220	100-350
B5	4,953	100	57	1500	220	100-400
B6	4,437	100	53	1720	220	100-440
B7	4,036	100	48	2050	220	100-500
B8	3,627	100	44	2200	220	100-550
B9	3,323	95	40	2200	220	100-580
B10	2,970	89	37	2200	220	100-600
B11	2,678	81	34	2200	220	100-600
B12	2,434	70	29	2200	220	100-600
B13	2,254	62,5	25	2200	220	100-600
B14	2,061	55	23	2200	220	100-600
B15	1,876	50	20	2200	220	100-600
B16	1,676	45	18,5	2200	220	100-600
B17	1,478	42	18	2200	220	100-600
B18	1,291	39	17	2200	220	100-600
B19	1,082	36	15	2200	220	100-600
B20	0,908	33	14	2200	220	100-600
B21	0,730	31	13	2200	220	100-600
B22	0,600	29	12,5	2200	220	100-600
B23	0,485	25	12	2200	220	100-600
B24	0,403	22	11	2200	220	100-600
B25	0	20	10	2200	220	100-600
B26	0	18	9	2200	220	100-600
B27	0	16	8	2200	220	100-600
B28	0	14	7	2200	220	100-600
B29	0	13	6	2200	220	100-600
B30	0	12,5	5,5	2200	220	100-600
B31	0	12	5	2200	220	100-600

Sumber : Japan Railway Technical Service Book 1, 1999:26

Untuk menjaga penurunan kecepatan secara bertahap, maka nilai tahanan mula sedikit demi sedikit dikurangi. Dengan arus jangkar yang kecil nilainya, sesuai dengan persamaan 2-6 maka akan dihasilkan kecepatan KRL yang tinggi yang sesuai dengan kondisi KRL saat sub periode meluncur. Munculnya torsi yang melawan arah gerak KRL akan menyebabkan KRL perlahan mengurangi kecepatannya. Nilai arus jangkar juga berpengaruh terhadap torsi pengereman yang dihasilkan, karena sesuai dengan persamaan 2-4 dengan nilai arus jangkar yang kecil maka torsi perlawanan yang dihasilkan juga kecil sehingga KRL tidak akan bergoncang akibat penurunan kecepatan dengan cepat secara tiba-tiba. Secara bertahap seiring dengan penurunan nilai tahanan mula, maka arus jangkar akan bertambah besar sehingga torsi pengereman akan bertambah besar pula. Adanya torsi pengereman yang tinggi akan menyebabkan KRL cepat berhenti namun dengan perlambatan yang teratur.

Pada tabel 4.8 dapat dilihat bahwa proses perlambatan KRL Rheostatik T6000 terdiri dari dua proses, yang pertama proses pengereman dengan kendali daya konstan, dimana kecepatan menurun sebanding dengan kenaikan torsi pengereman yakni antara *notch* B1-B8 dan yang kedua proses pengereman dengan kendali torsi konstan dimana torsi pengereman dijaga tetap konstan pada nilai maksimal yakni antara *notch* B9-B31. Karena pengereman dengan kendali daya konstan pada torsi maksimal untuk setiap *notch* tidak menghasilkan penurunan kecepatan KRL yang berarti seiring dengan kenaikan nilai torsi pengeremannya maka kondisi ini dapat diabaikan. Oleh sebab itu pada sub periode perlambatan dianggap KRL hanya melakukan operasi kendali torsi konstan untuk mempermudah perhitungan.

Pada sub periode pengereman ini, adanya jalan rel yang memiliki gradien kemiringan dapat mempercepat proses pengereman KRL oleh karena itu beban mekanis pada proses pengereman sistem traksi dapat diperoleh dengan menjumlahkan persamaan 2-41 dan persamaan 2-45 dan menguranginya dengan persamaan 2-44 sebagai berikut :

$$F_{rgc} = F_r + F_c - F_g$$

Dengan asumsi seperti halnya pada sub periode pengasutan, maka persamaan 4-10 diatas menjadi :

$$\begin{aligned} F_{rgc} &= F_r \\ &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2)/1000 \\ &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2)/1000 \\ &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2)/1000 \end{aligned}$$

$$= 3,247 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \quad (4-10)$$

Adanya proses kendali daya konstan pada awal sub periode perlambatan ini dimana torsi perlawanan yang pertama kali dibangkitkan kecil nilainya dapat diabaikan karena torsi tersebut berubah nilainya semakin besar dalam waktu yang singkat dan hanya berfungsi agar KRL tidak mengalami hentakan yang keras sehingga gaya perlawanan pada sub periode ini dapat diperoleh dengan menggunakan torsi maksimum yang dapat dibangkitkan oleh sistem pada posisi B31 yakni 2200 kg/m dan mengasumsikan efisiensi transmisi daya 0,9 kemudian memasukkannya ke persamaan 2-47 sehingga diperoleh :

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN} \quad (4-11)$$

Pada sub periode perlambatan ini, gaya percepatan linier bernilai negatif sehingga persamaan 2-38 dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned} F_t - (F_r + F_g + F_c) &= -F_a \\ F_{rgc} - F_t &= \left(277,8m \frac{dv}{dt} \right) / 1000 \\ \Delta F(v) &= 0,2778 m \frac{dv}{dt} \\ \int dt &= \int 0,2778 m \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \end{aligned} \quad (4-12)$$

Dengan memasukkan persamaan 4-10 dan persamaan 4-11 ke dalam persamaan 4-12 didapatkan waktu tempuh KRL dalam sub periode perlambatan :

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-555,182 + 0,02549v + 0,00063v^2} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{v^2 + 40,4603v - 881241,27} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 918,732)(v + 959,193)} \\ &= 51,56 \int \frac{-1587,3 dv}{(918,732 - v)(v + 959,193)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -43,581 \int \left(\frac{1}{918,732 - v} + \frac{1}{v + 959,193} \right) dv \\
&= -43,581 (-\ln|918,732 - v| + \ln|v + 959,193|) + C \\
&= -43,581 \ln \left| \frac{959,193 + v}{918,732 - v} \right| + C \quad (4-13)
\end{aligned}$$

Dengan membangkitkan torsi maksimum 2200 kg/m pada posisi B31 maka berdasarkan tabel 4.8 kecepatan akhir yang dicapai adalah 12 km/h. Dapat dilihat pada tabel 4.6 bahwa dengan kondisi kemiringan rel 0 permil maka kecepatan awal KRL adalah 97,24 km/h. Diasumsikan kecepatan perubahan *notch* tetap maka dengan memasukkan nilai kecepatan sebagai batas integrasi ke dalam persamaan 4-13, waktu tempuh KRL dalam sub periode perlambatan adalah :

$$\begin{aligned}
t &= -43,581 \ln \left| \frac{959,193 + v}{918,732 - v} \right|_{97,24}^{12} \\
&= -43,581 (0,0687 - 0,2515) \\
&= -43,581 (-0,1828) \\
t &= 7,967 \text{ detik}
\end{aligned}$$

Untuk menghitung perlambatan dapat mempergunakan persamaan 4-2 sebagai berikut :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{97,24 - 12}{7,967} = 10,699 \text{ km/h/det}$$

Kinerja KRL untuk berbagai kondisi kemiringan rel dapat dilihat pada tabel 4.9 berikut ini.

Berdasarkan tabel 4.9 dapat diketahui bahwa semakin tinggi gradien kemiringan jalan rel, maka waktu perlambatan KRL dan deakselerasi akan semakin cepat. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh dari gaya gravitasi yang membantu proses perlambatan KRL. Selain itu semakin cepatnya waktu perlambatan dan deakselerasi KRL karena kecepatan maksimum yang harus diturunkan untuk mencapai kecepatan 12 km/h semakin kecil seiring dengan kenaikan gradien, seperti yang terlihat pada tabel 4.6.

Perhitungan pada tabel 4.9 berdasarkan pada kondisi yang terdapat pada tabel 4.6, apabila kecepatan terakhir yang diberlakukan sebelum proses perlambatan dianggap sama untuk semua gradien kemiringan, maka hasilnya tentunya tidak jauh berbeda, dimana semakin tinggi gradien kemiringan maka waktu perlambatan dan deakselerasi akan semakin cepat pula, demikian juga apabila perhitungan pada tabel 4.9 didasarkan

dengan kondisi torsi minimum perlambatan seperti yang terdapat pada tabel 4.8 maka akan memberikan hasil yang sama.

Tabel 4.9 Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Perlambatan

Gradien Kemiringan (%)	Waktu Perlambatan (detik)	Deakselerasi (km/h/det)
0	7,967	10,699
2,5	6,704	11,571
5	5,292	12,483
7,5	4,655	13,362
10	3,824	14,251
12,5	3,091	15,134
15	2,437	16,023
17,5	1,852	16,903
20	1,321	17,827
22,5	0,843	18,718
25	0,41	19,505

Sumber : Perhitungan

4.5 Analisis Sistem Kendali KRL VVVF Holec BN

Dalam motor traksi jenis motor induksi, kecepatan putar diubah dengan mengubah frekuensi dari catu daya. Tetapi bila impedansi dari motor sangkar dinaikkan dengan menambah kecepatan putar, arus yang mengalir ke dalam konduktor dari rotor menurun dan momen dari motor menurun juga. Maka tegangan yang diberikan ke motor harus dinaikkan sebanding dengan kecepatan putar untuk mempertahankan momen konstan. Ini diperlukan oleh motor traksi induksi dengan kendali variabel frekuensi dan variabel tegangan (VVVF) guna mengendalikan kecepatan motor.

4.5.1 Unjuk Kerja Motor Traksi Dengan Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni

Unjuk kerja motor traksi menggunakan sumber tegangan sinusoida murni dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan 2-7 sampai dengan persamaan 2-25. Adapun parameter motor induksi yang dipergunakan didapatkan dari Train Operating Manual BN/HOLEC sebagai berikut :

- $R_l = 0.46 \Omega$

- $X_1 = 2.7963 \Omega$
- $X_m = 10.9025 \Omega$
- $R_2 = 2.414 \Omega$
- $X_2 = 2.7963 \Omega$

Berdasarkan persamaan 2-12, putaran sinkron KRL dengan frekuensi 56 Hz adalah

$$n_s = \frac{120 \cdot f_1}{p} = \frac{120 \times 56}{4} = 1680 \text{ rpm}$$

Pada data teknis KRL VVVF Holec BN dari Training Operating Manual BN/HOLEC, diketahui bahwa kecepatan nominal KRL adalah 1659 rpm, oleh karena itu berdasarkan persamaan 2-10, besarnya slip adalah

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1680 - 1659}{1680} = 0,0125$$

Tegangan *thevenin* (V_{ab}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2-18 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \cdot V_1 = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} \cdot V_1 \\ &= \frac{10,9025}{\sqrt{0,46^2 + (2,7963 + 10,9025)^2}} \cdot \frac{1716}{\sqrt{3}} = 788,053 \text{ volt} \end{aligned}$$

Nilai dari impedansi thevenin dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2-17 dan 2-19 sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} Z_{ab} &= \frac{jX_m \cdot Z_1}{jX_m + Z_1} = \frac{j10,9025 \cdot (0,46 + j2,7963)}{j10,9025 + 0,46 + j2,7963} \\ &= \frac{-30,4867 + j5,0152}{0,46 + j13,6988} = 0,291 + j2,2352 \Omega \end{aligned}$$

$$R_{ab} = 0,291 \Omega$$

$$X_{ab} = 2,2352 \Omega$$

Torsi mekanik nominal dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2-24

$$\begin{aligned} T_{mek} &= \frac{3V_{ab}^2 (R'_2 / s)}{\omega_s (R_{ab} + R'_2 / s)^2 + (X_{ab} + X'_2)^2} \\ &= \frac{3 \times 788,053^2 \times \left(\frac{2,414}{0,0125} \right)}{\frac{2 \times 3,14 \times 1680}{60} \times \left(\left(0,291 + \frac{2,414}{0,0125} \right)^2 + (2,2352 + 2,7963)^2 \right)} \end{aligned}$$

$$= 54,634 \text{ Nm}$$

Untuk mengetahui nilai torsi maksimum yang mampu dihasilkan oleh traksi motor maka harus diketahui nilai slip maksimum dari motor, dengan menggunakan persamaan 2-26 diperoleh :

$$s_m = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{ab}^2 + (X_{ab} + X'_2)^2}} = \frac{2,414}{\sqrt{0,291^2 + (2,2352 + 2,7963)^2}}$$

$$= 0,479$$

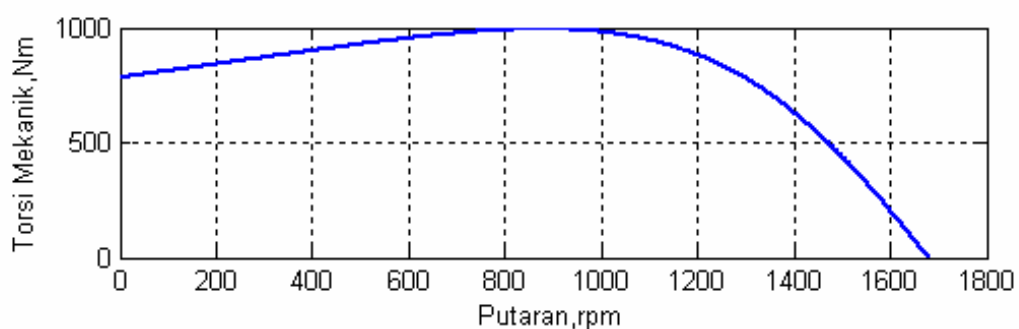
Dari persamaan 2-25, torsi maksimum yang dihasilkan adalah

$$T_{max} = \frac{3V_{ab}^2 \frac{R'_2}{s_m}}{\omega_s \left(\left(R_{ab} + \frac{R'_2}{s_m} \right)^2 + (X_{ab} + X'_2)^2 \right)}$$

$$= \frac{3 \times 788,053^2 \times \left(\frac{2,414}{0,479} \right)}{\frac{2 \times 3,14 \times 1680}{60} \times \left(\left(0,291 + \frac{2,414}{0,479} \right)^2 + (2,2352 + 2,7963)^2 \right)}$$

$$= 993,7427 \text{ Nm}$$

Untuk mengetahui karakteristik torsi mekanik fungsi putaran dari motor traksi KRL VVVF Holec BN yakni jenis DMKT 55/18,5, dipergunakan program simulasi dengan bantuan *software* Matlab versi 7 dan hasilnya adalah seperti pada gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Grafik Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Dari Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni Pada Kondisi Beban Berubah-Ubah.

Sumber : Simulasi

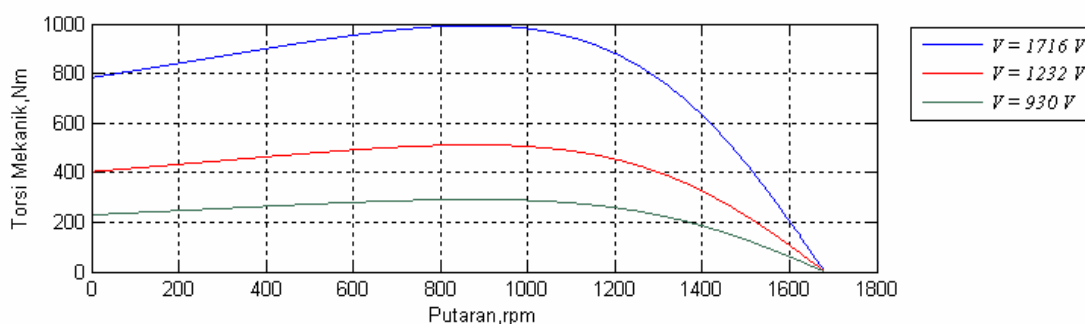
Tabel 4.10 Data Hasil Simulasi Unjuk Kerja Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni.

No	Putaran (rpm)	Torsi Mekanik (Nm)
1	1655	65,54
2	1598	210,4
3	1495	447,3
4	1386	653,3
5	1260	823,3
6	1179	896,5
7	1089	950,8
8	927,4	991,6
9	866,6	993,7
10	761	985,5
11	653,5	966,5
12	485,5	924,6

Sumber : Simulasi

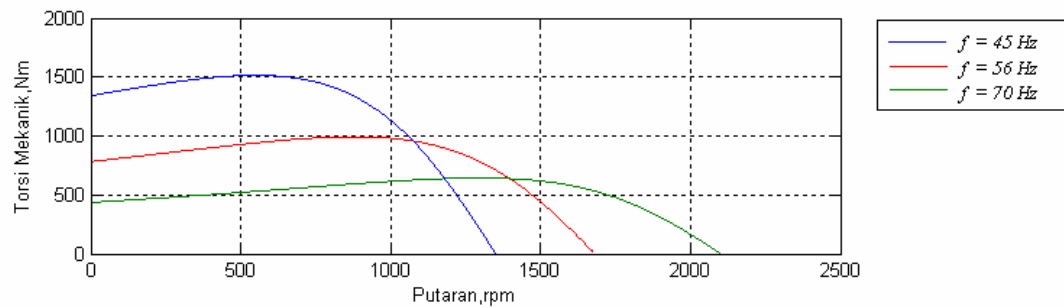
Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi diatas, dapat dilihat bahwa kinerja setiap motor traksi yang dipergunakan oleh KRL VVVF Holec BN pada kondisi nominal menghasilkan torsi puncak 993,7427 Nm pada putaran sekitar 866,6 rpm.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan salah satu dari tegangan atau frekuensi nominal dari motor traksi KRL VVVF Holec BN terhadap unjuk kerja motor dapat dilihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 berikut ini.



Gambar 4.5 Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni Variabel dan Frekuensi Konstan 56 Hz

Sumber : Simulasi



Gambar 4.6 Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Menggunakan Frekuensi Masukan Variabel dan Tegangan Masukan Konstan 1716 V.

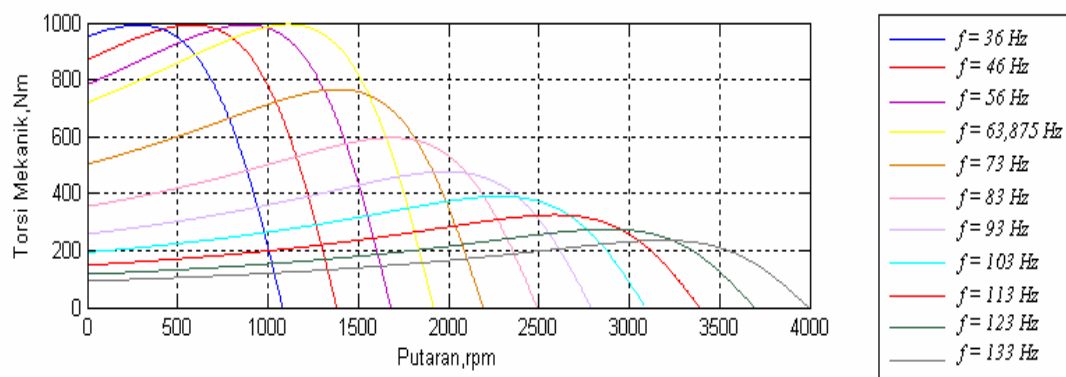
Sumber : Simulasi

Dari gambar 4.5 dan gambar 4.6 diatas, dapat diketahui bahwa dengan hanya mengubah-ubah nilai tegangan masukan maka torsi yang dibangkitkan KRL akan ikut berubah, hal ini tentunya tidak baik untuk proses pengasutan KRL karena ketika KRL melakukan pengasutan, untuk mencegah terjadinya arus pengasutan yang tinggi maka tegangan masukan diperkecil sementara ketika tegangan masukan diperkecil torsi yang dihasilkan pun rendah sehingga tidak akan mampu memikul beban. Sementara itu dengan mengubah frekuensi masukan dibawah nilai nominalnya sebenarnya menurut gambar 4.6 diatas dapat mempertinggi nilai torsi pengasutan hanya saja hal ini akan mengakibatkan kejenuhan pada fluksi celah udara sehingga parameter motor tidak valid lagi digunakan untuk menentukan karakteristik torsi kecepatan dan juga nilai reaktansi akan turun sehingga arus motor menjadi tinggi.

Oleh karena itu dipergunakan kontrol tegangan dan frekuensi sekaligus sehingga torsi maksimum akan tetap berada di dalam nilai nominal sementara tegangan yang diterapkan selama pengasutan kecil sehingga arus pengasutan pun kecil.

4.5.2 Unjuk Kerja Motor Traksi Dengan Menggunakan Catu Inverter Bermodulasi Lebar Pulsa

Pengaturan tegangan dan frekuensi dilakukan untuk mendapatkan nilai torsi yang mendekati konstan pada setiap perubahan putaran sinkronnya. Pengaturan putaran dapat dilakukan dengan menaikkan putaran diatas nominal ataupun dibawah nominal, adapun dengan menaikkan putaran diatas nominal, maka tegangan masukan motor harus tetap dijaga pada nilai nominal sehingga dengan operasi ini didapatkan torsi yang menurun sesuai dengan gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Karakteristik Kontrol Tegangan dan Frekuensi KRL VVVF Holec BN

Sumber : Simulasi

Karakteristik torsi konstan akan didapat jika setiap perubahan frekuensi akan menghasilkan nilai torsi maksimum yang sama. Pada pengaturan rasio V/f konstan untuk frekuensi rendah tidak akan menghasilkan torsi maksimum yang konstan. Tegangan yang sesuai pada frekuensi tertentu akan menghasilkan torsi maksimum yang konstan dapat dicari dengan menentukan besarnya torsi maksimum pada frekuensi nominal dan tegangan nominal. Torsi maksimum pada frekuensi nominal dan tegangan nominal adalah 993,7427 Nm.

Jika diambil frekuensi 46 Hz, maka sesuai dengan persamaan 2-30 diperoleh

$$a = \frac{f}{f_{nom}} = \frac{46}{56} = 0,821$$

dengan memasukkan nilai $a = 0,821$ maka Z_{ab} dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2-32 sebagai berikut

$$\begin{aligned} Z_{ab} &= \frac{ajX_m(R_1 + ajX_1)}{R_1 + aj(X_1 + X_m)} = \frac{0,821 \times j10,9025 \times (0,46 + (0,821 \times j2,7963))}{0,46 + (0,821 \times j(2,7963 + 10,9025))} \\ &= \frac{-20,549 + j4,117}{0,46 + j11,247} = 0,291 + j1,838 \end{aligned}$$

Slip maksimum s_m pada frekuensi 46 Hz adalah

$$\begin{aligned} s_m &= \frac{R'_2}{\sqrt{R_{ab}^2 + (X_{ab} + aX'_2)^2}} = \frac{2,414}{\sqrt{0,291^2 + (1,838 + (0,821 \times 2,7963))^2}} \\ &= \frac{2,414}{4,144} = 0,583 \end{aligned}$$

Dengan memasukkan nilai s_m dan Z_{ab} diatas ke dalam persamaan 2-35 maka akan diperoleh nilai torsi maksimum pada frekuensi 46 Hz yakni

$$\begin{aligned}
 T_m &= \frac{3V_{ab}^2 \frac{R'_2}{s_m}}{a\omega_s \left(\left(R_{ab} + \frac{R'_2}{s_m} \right)^2 + (X_{ab} + aX'_2)^2 \right)} \\
 &= \frac{3 \times V_{ab}^2 \times \frac{2,414}{0,583}}{0,821 \times \frac{6,28 \times 120 \times 46}{60 \times 4} \left(\left(0,291 + \frac{2,414}{0,583} \right)^2 + (1,838 + (0,821 \times 2,7963))^2 \right)} \\
 &= 2,852 \times 10^{-3} V_{ab}^2
 \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan torsi maksimum yang sama maka :

$$T_{max\ 56\ Hz} = T_{max\ 46\ Hz}$$

$$993,7427 = 2,852 \times 10^{-3} V_{ab}^2$$

$$V_{ab} = \sqrt{\frac{993,7427}{2,852 \times 10^{-3}}}$$

$$V_{ab} = 620,382\ V$$

V_{l-l} yang harus diberikan pada frekuensi 46 Hz adalah

$$\begin{aligned}
 V_{l-l} &= \frac{R_1 + aj(X_m + X_1)}{ajX_m} V_{ab} \cdot \sqrt{3} \\
 &= \frac{\sqrt{0,46^2 + (0,821 \times (10,9025 + 2,7963))^2}}{0,821 \times 10,9025} \times \sqrt{3} \times 620,382 \\
 &= 1352,909\ V
 \end{aligned}$$

Jadi tegangan yang harus diberikan untuk menjaga nilai torsi tetap pada nilai nominalnya adalah 1352,909 V untuk frekuensi masukan 46 Hz.

Inverter module yang dipergunakan tipe VSI (VVVF) dapat dipergunakan untuk frekuensi masukan motor antara 0-133 Hz. Untuk frekuensi masukan lainnya maka tegangan sumber yang diperlukan oleh motor traksi dapat dilihat pada tabel 4.11 dibawah ini.

Berdasarkan tabel 4.11 diatas, secara garis besar pengoperasian KRL dibagi menjadi 2 jenis, yang pertama untuk frekuensi masukan dibawah nominal yakni dibawah 56 Hz dipergunakan kontrol VVVF atau perbandingan tegangan dan frekuensi yang tetap yakni sekitar

$$\frac{V_{nom}}{f_{nom}} = \frac{1716}{56} = 30,643$$

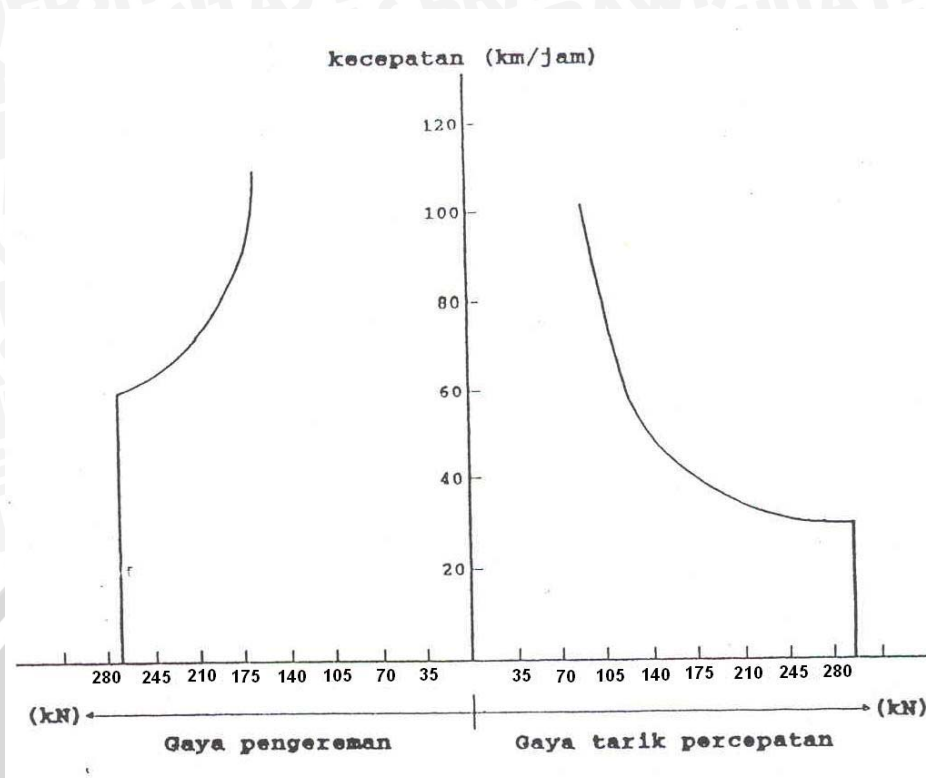
Tabel 4.11 Perbandingan Tegangan dan Frekuensi Keluaran
Dari *Inverter Module* KRL VVVF Holec BN.

Frekuensi (Hz)	Tegangan (Volt)
6	235,9614
16	530,584
26	825,9584
36	1122,3
46	1419
56	1716
63,875	1950
73	1950
83	1950
93	1950
103	1950
113	1950
123	1950
133	1950

Sumber : Simulasi

Hal ini dapat menjaga torsi motor traksi pada nilai yang tetap untuk setiap perubahan putarannya yakni 993,7427 Nm. Dengan adanya suplai tegangan dari inverter, KRL dapat bekerja dalam tegangan sumber sampai 1950 V AC, hal ini dapat berpengaruh pada torsi maksimum yang dibangkitkannya, yang dapat mencapai 2210 Nm seperti keterangan pada Train Operating Manual BN/HOLEC. Kemudian yang kedua untuk meningkatkan kecepatan KRL seperti pada gambar 4.7 dipergunakan kontrol frekuensi masukan dengan frekuensi masukan dioperasikan diatas nilai nominalnya dengan rentang frekuensi antara 56-133 Hz dan menjaga tegangan masukan tetap pada nilai nominalnya dari keluaran inverter yakni 1950 V.

Kinerja keseluruhan sistem KRL VVVF Holec BN dalam satu periode perjalanan untuk satu set kereta digambarkan oleh gambar 4.8.



Gambar 4.8 Kurva Gaya-Kecepatan Pada Percepatan dan Pengereman Sistem Traksi KRL VVVF Holec BN
Sumber : PT. INKA, 1992 : 1-12

Untuk mengatur kecepatan pergerakan KRL dikendalikan oleh suatu sistem inverter VVVF yang dikendalikan oleh masinis melalui panel kontrol untuk setiap mode operasinya. Terdapat 5 mode operasi pada panel kontrol yang dapat dipilih yakni :

1. Mode I : Kendali torsi konstan pada saat pengasutan.
2. Mode II : Kendali daya konstan.
3. Mode III : Kendali tegangan konstan dengan karakteristik motor pada daerah kecepatan bebas.
4. Mode IV : Operasi melaju dengan mesin mati.
5. Mode V : Kendali torsi konstan pada daerah pengereman regeneratif.

Berikut ini adalah proses pergerakan kereta berdasarkan gambar 2.17 :

4.5.3 Sub Periode Pengasutan

Pada sub periode pengasutan KRL mulai mempersiapkan untuk melakukan proses starting bergerak dari keadaan diam sampai meluncur untuk mencapai kecepatan tertentu yang mampu dicapai. Berdasarkan gambar 4.8 terlihat selama melakukan proses

pengasutan dengan kondisi beban nominal KRL mampu mencapai kecepatan maksimal 30 km/jam.

Pengasutan pada motor induksi bisa dilakukan secara langsung dengan tegangan penuh dan pengasutan dengan pengurangan tegangan. Pengasutan secara langsung adalah cara paling sederhana yang dapat dilakukan untuk pengasutan motor induksi, tetapi pada pengasutan secara langsung arus asutnya sangat besar, yaitu berkisar 5 sampai 7 kali arus nominal dengan torsi asut hanya 1 sampai 2 kali torsi nominal. Arus asut yang sangat besar ini bisa menyebabkan panas yang tinggi yang akhirnya akan mengurangi umur motor. Disamping itu juga dibutuhkan rating pengaman yang tinggi untuk memproteksi motor tersebut. Oleh sebab itu pengasutan secara langsung hanya digunakan untuk motor-motor dengan kapasitas kecil.

Untuk itulah pada sistem traksi KRL tidak digunakan pengasutan secara langsung tetapi dipergunakan rangkaian inverter, karena dengan adanya rangkaian inverter ini tegangan dan frekuensi dapat diubah-ubah sehingga memberikan hasil yang baik pada saat pengasutan dan pengaturan kecepatan.

Untuk merumuskan persamaan beban KRL VVVF Holec BN pada kondisi normal dalam arti tidak terdapat jalur yang menanjak pada kondisi pengasutan maka diperlukan beberapa asumsi awal sebagai berikut :

- KRL terdiri dari satu set yang terdiri dari TC1-MC1-MC2-TC2 dengan berat total 226,65 ton.
- KRL bergerak pada jalan rel lurus dengan gradien kemiringan 0 permil.
- Adanya jalur rel yang berbelok hanya pada beberapa titik jalur sehingga kondisi ini dapat diabaikan.

Beban mekanis untuk pengasutan pada sistem traksi dapat diperoleh dengan menjumlahkan persamaan 2-41, persamaan 2-44 dan persamaan 2-45 sebagai berikut :

$$F_{rgc} = F_r + F_g + F_c,$$

Namun dengan asumsi diatas maka F_c dan F_g tidak ada sehingga :

$$\begin{aligned} F_{rgc} &= F_r \\ &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2)/1000 \\ &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2)/1000 \\ &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2)/1000 \\ &= 3,509 + 0,03111v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4-14)$$

Sistem PWM inverter mengendalikan 4 buah motor traksi, oleh karena KRL disusun *single unit* maka terdapat 8 buah motor traksi sehingga gaya tarik yang mampu dibangkitkan adalah 2 kali lipat gaya tarik yang terdapat pada gambar 4.8. Gaya tarik percepatan pada saat pengasutan yang diperoleh sebesar :

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN} \quad (4-15)$$

Dengan memasukkan persamaan 4-14 dan persamaan 4-15 ke dalam persamaan 4-1 didapatkan waktu tempuh KRL dalam sub periode pengasutan :

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{570,491 - 0,0311v - 0,00063v^2} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 905541,27} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(927,237 - v)(v + 976,602)} \\ &= 52,495 \int \left(\frac{1}{927,237 - v} + \frac{1}{v + 976,602} \right) dv \\ &= 52,495 (-\ln|927,237 - v| + \ln|v + 976,602|) + C \\ &= 52,495 \ln \left| \frac{976,602 + v}{927,237 - v} \right| + C \quad (4-16) \end{aligned}$$

Proses pengasutan dimulai sejak KRL berhenti sampai mencapai kecepatan tertentu. Berdasarkan gambar 4.8, kecepatan akhir yang dicapai oleh sistem dengan kondisi sesuai yang diasumsikan adalah 30 km/h. Dengan memasukkan nilai kecepatan sebagai batas integrasi ke dalam persamaan 4-16, waktu tempuh KRL dalam sub periode pengasutan adalah :

$$\begin{aligned} t &= 52,495 \ln \left| \frac{976,602 + v}{927,237 - v} \right|_0^{30} \\ &= 52,495 (0,115 - 0,052) \\ &= 52,495 (0,063) \end{aligned}$$

$$t = 3,307 \text{ detik}$$

Untuk menghitung percepatan dapat menggunakan persamaan 4-2 sebagai berikut :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 - 0}{3,307} = 9,072 \text{ km/h/det}$$

Pada kondisi seperti yang diasumsikan, KRL VVVF Holec BN akan melakukan proses pengasutan dalam waktu 3,307 detik untuk mencapai kecepatan dari nol sampai 30 km/jam dengan percepatan sebesar 9,072 km/jam/det.

Jalur kereta Surabaya-Malang memiliki beberapa variasi kondisi kemiringan rel. Untuk mengetahui kemampuan KRL VVVF Holec BN dalam melakukan operasi pengasutan pada berbagai kondisi kemiringan rel dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4.12 Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL VVVF Holec BN
Pada Sub Periode Pengasutan

Gradien Kemiringan (%)	Waktu Tempuh (detik)	Akselerasi (km/h/det)
0	3,307	9,072
2,5	3,647	8,226
5	4,094	7,328
7,5	4,679	6,412
10	5,44	5,515
12,5	6,519	4,602
15	8,054	3,725
17,5	10,408	2,882
20	15,047	1,994
22,5	26,921	1,114
25	130,273	0,23

Sumber : Perhitungan

Dengan melihat tabel 4.12, dapat diketahui bahwa semakin miring jalur rel maka waktu tempuh akan semakin lambat dan akselerasi KRL akan semakin rendah, hal ini karena adanya pengaruh gaya gravitasi yang timbul akibat miringnya jalan rel, dimana selain untuk menggerakkan beban kereta dari keadaan diam pada waktu pengasutan, motor pun harus mampu melawan gaya gravitasi tersebut. Kemudian dapat diketahui pula bahwa KRL VVVF Holec BN ternyata mampu untuk melakukan pengasutan pada jalan rel dengan gradien kemiringan 25 permil.

4.5.4 Sub Periode Percepatan

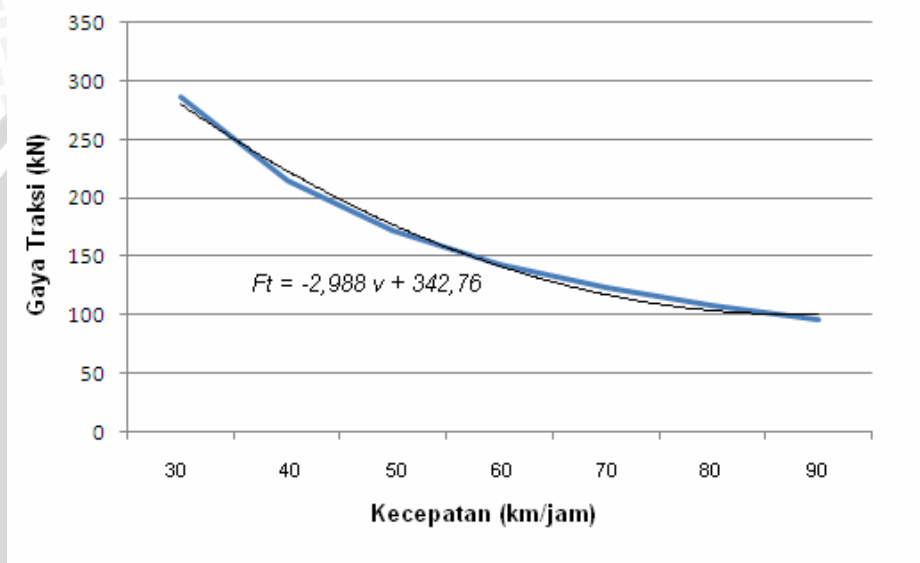
Sub periode ini didapat saat sistem traksi sudah mencapai daya nominal namun masih menaikkan kecepatannya. Berdasarkan kurva karakteristik gaya-kecepatan pada gambar 4.8, diketahui setelah mencapai kecepatan puncak pengasutan 30 km/jam, KRL

akan terus menaikkan kecepatannya sampai mencapai 100 km/h. Nilai dari kenaikan kecepatan berbanding dengan gaya traksi dapat dilihat pada tabel 4.13 berikut :

Tabel 4.13 Karakteristik Pengaturan Motor Traksi KRL VVVF Holec BN
Pada Sub Periode Percepatan.

Kecepatan (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100
Gaya Traksi (kN)	287	215,25	172,2	143,5	123,008	107,625	95,673	86,1

Sumber : PT. INKA, 1992:1-12



Gambar 4.9 Grafik Karakteristik Gaya Fungsi Kecepatan KRL VVVF Holec BN
Pada Sub Periode Percepatan.

Sumber : Analisis Data

Dengan nilai daya konstan, maka dengan persamaan diatas akan diperoleh persamaan gaya fungsi kecepatan. Untuk memudahkan perumusan persamaan tersebut, maka data pada tabel 4.13 diatas digambarkan ke dalam sebuah grafik seperti yang terlihat pada gambar 4.9 dan melalui metode pendekatan karakteristik grafik dengan bantuan program Microsoft Excel akan diperoleh persamaan torsi fungsi kecepatan sebagai berikut :

$$F_t = 342,76 - 2,988v \text{ kN} \quad (4-17)$$

Karena terdapat 2 sistem PWM inverter untuk setiap rangkaian kereta yang diasumsikan, dimana setiap satu sistem mengendalikan 4 buah motor traksi pada kereta MC maka persamaan 4-17 diatas menjadi :

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN} \quad (4-18)$$

Pada sub periode percepatan ini, KRL akan menghadapi jalur rel dengan berbagai kondisi baik kemiringan yang beraneka ragam maupun jalan rel yang berbelok, namun mengingat jalan rel yang berbelok hanya ditemui pada beberapa titik maka kondisi ini dapat diabaikan. Dengan asumsi yang sama dengan sub periode pengasutan, maka persamaan beban KRL sama dengan persamaan 4-14 yakni :

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2)/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2)/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2)/1000 \\
 &= 3,509 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 4-18 dan persamaan 4-14 ke dalam persamaan 4-1 diperoleh :

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{682,011 - 6,007v - 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9535,079v + 1082557,143} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{(112,214 - v)(9647,293 + v)} \\
 &= 10,24 \int \left(\frac{1}{112,214 - v} + \frac{1}{9647,293 + v} \right) dv \\
 &= 10,24 (-\ln|112,214 - v| + \ln|9647,293 + v|) + C \\
 &= 10,24 \ln \left| \frac{9647,293 + v}{112,214 - v} \right| + C \tag{4-19}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan 4-19, pada sub periode percepatan ini KRL VVVF Holec BN mampu melaju hingga kecepatan puncak 112,214 km/h pada kondisi yang diasumsikan, oleh karenanya range kecepatan yang akan dimasukkan ke dalam persamaan 4-19 adalah antara 30 - 112,213 km/h sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned}
 t &= 10,24 \ln \left| \frac{9647,293 + v}{112,214 - v} \right|_{30}^{112,213} \\
 &= 10,24 (16,094 - 4,768) \\
 &= 10,24 (11,326)
 \end{aligned}$$

$$= 115,978 \text{ detik}$$

Untuk menghitung percepatan dapat mempergunakan persamaan 4-2 sebagai berikut :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{112,213 - 30}{115,978} = 0,709 \text{ km/h/detik}$$

Tabel 4.14 Pengaruh Kemiringan Terhadap Kecepatan Maksimum
KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Percepatan

Gradien Kemiringan (%)	Kecepatan Maksimum (km/h)
0	112,214
2,5	103,174
5	94,117
7,5	85,044
10	75,953
12,5	66,846
15	57,757
17,5	48,579
20	39,42
22,5	30,243
25	21,048

Sumber : Perhitungan

Kondisi pengaturan KRL dengan beban nominal menghasilkan waktu tempuh 115,978 detik untuk mencapai kecepatan maksimum KRL 112,214 km/h dengan akselerasi 0,709 km/h/detik. Untuk mengetahui pengaruh kemiringan terhadap kecepatan maksimum yang mampu dicapai KRL dapat dilakukan dengan mencari persamaan seperti yang dilakukan untuk mencari persamaan 4-19 dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.14.

Dari tabel 4.14 dapat dilihat bahwa pada saat KRL melewati jalan rel dengan kemiringan lebih dari 22,5 permil maka KRL tidak akan melakukan proses percepatan melainkan perlambatan karena kecepatan maksimal yang mampu dicapai dibawah nilai kecepatan puncak proses pengasutan, artinya secara bertahap KRL akan mengurangi kecepatan karena beban yang harus ditarik diatas batas kemampuan KRL. Untuk mengetahui pengaruh kemiringan jalur rel terhadap waktu tempuh dan akselerasi KRL dapat dilihat pada tabel 4.15.

Tabel 4.15 Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Percepatan.

Gradien Kemiringan (%)	Kecepatan Maksimum (km/h)	Waktu Tempuh (detik)	Akselerasi (km/h/det)
0	112,214	115,978	0,709
2,5	103,174	114,983	0,636
5	94,117	113,84	0,563
7,5	85,044	112,464	0,489
10	75,953	110,805	0,415
12,5	66,846	108,725	0,339
15	57,757	105,994	0,262
17,5	48,579	102,017	0,182
20	39,42	95,135	0,099

Sumber : Perhitungan

Dari tabel 4.15 dapat dilihat bahwa kemiringan jalan rel berdampak terhadap kemampuan akselerasi KRL, dimana semakin tinggi gradien kemiringan maka kemampuan akselerasi KRL akan semakin rendah. Untuk kondisi gradien kemiringan diatas 22,5 permil tidak dilakukan perhitungan karena berdasarkan tabel 4.15 kecepatan maksimal KRL untuk kondisi tersebut dibawah kecepatan puncak kondisi pengasutan sehingga KRL akan mengalami proses perlambatan, hal ini dikarenakan gaya tarik maksimum yang mampu dicapai KRL pada kondisi percepatan lebih rendah daripada gaya tarik maksimum yang mampu dicapai oleh KRL pada saat pengasutan.

4.5.5 Sub Periode Meluncur

Sub periode meluncur terjadi pada saat tidak ada penambahan kecepatan pada KRL. Dengan demikian kecepatan KRL konstan, sehingga didapatkan nilai percepatan $a = 0$. KRL akan melakukan proses meluncur ini selama perjalanan sampai tiba saat mendekati stasiun tujuan untuk kemudian melakukan proses perlambatan.

4.5.6 Sub Periode Perlambatan

Ketika KRL telah mendekati stasiun tujuan, maka KRL akan segera melakukan proses pengereman. Pada KRL VVVF Holec BN ini, KRL akan melakukan pengereman regeneratif, dimana kecepatan akan berkurang sedikit demi sedikit seiring dengan

berubahnya frekuensi pada pengaturan frekuensi motor induksi. Selama perubahan frekuensi, kecepatan akan berubah mengikuti kurva seperti pada gambar 4.8.

Seperti halnya proses perhitungan pada sub periode sebelumnya, untuk mengetahui kinerja KRL dalam kondisi normal selama sub periode perlambatan digunakan asumsi yang sama, sehingga menurut persamaan 4-10 untuk sub periode pengereman persamaan beban mekanis berlaku :

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2)/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2)/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2)/1000 \\
 &= 3,509 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \quad (4-20)
 \end{aligned}$$

Berdasarkan gambar 4.8, sub periode perlambatan terjadi dalam dua kondisi, yang pertama pada kondisi kecepatan akhir KRL 60 – 100 km/h, berlaku pengereman dengan kendali daya konstan dan pada kondisi kecepatan akhir KRL 0 – 60 km/h, berlaku pengereman dengan kendali torsi konstan.

Pada kondisi pertama dimana berlaku kendali daya konstan, nilai dari penurunan kecepatan berbanding dengan gaya pengereman sistem dapat dilihat pada tabel 4.16.

Tabel 4.16 Karakteristik Pengaturan Motor Traksi KRL VVVF Holec BN
Pada Sub Periode Perlambatan Dengan Kendali Daya Konstan.

Kecepatan (km/h)	100	90	80	70	60
Gaya Traksi (kN)	162,75	180,833	203,438	232,5	271,25

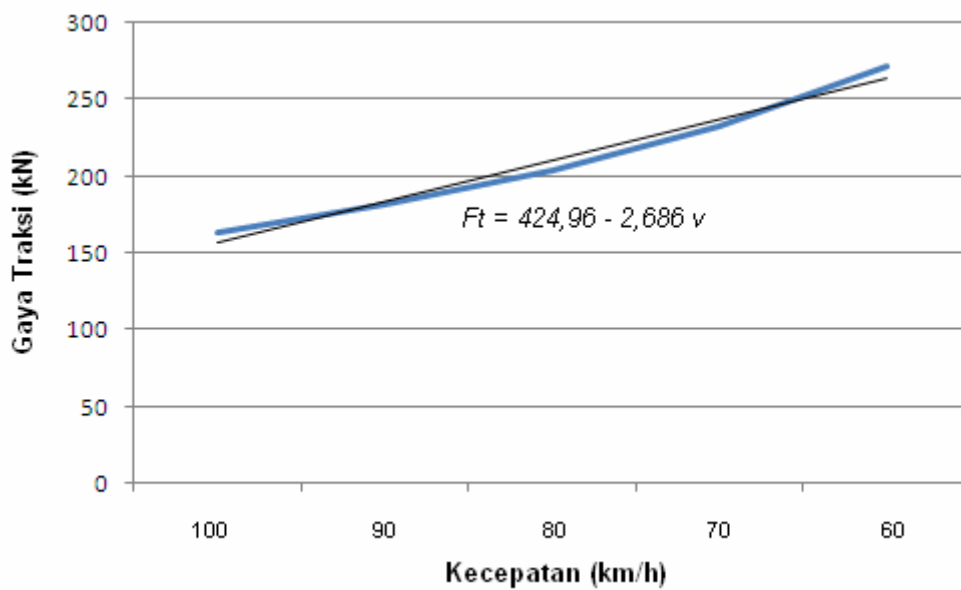
Sumber : PT. INKA, 1992:1-12

Dengan nilai daya konstan, maka dengan persamaan diatas akan diperoleh persamaan gaya fungsi kecepatan. Untuk memudahkan perumusan persamaan tersebut, maka data pada tabel 4.16 diatas digambarkan ke dalam sebuah grafik seperti yang terlihat pada gambar 4.10 dibawah ini dan melalui metode pendekatan karakteristik grafik dengan bantuan program Microsoft Excel akan diperoleh persamaan torsi fungsi kecepatan sebagai berikut

$$F_t = 424,96 - 2,686v \text{ kN} \quad (4-21)$$

Karena terdapat 2 sistem PWM inverter untuk setiap rangkaian kereta yang diasumsikan, dimana setiap satu sistem mengendalikan 4 buah motor traksi pada kereta MC maka persamaan 4-17 diatas menjadi :

$$F_t = 2 \times (424,96 - 2,686v) = 849,92 - 5,372v \text{ kN} \quad (4-22)$$



Gambar 4.10 Grafik Karakteristik Gaya Fungsi Kecepatan KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Perlambatan Dengan Kendali Daya Konstan.

Sumber : Analisis Data

Dengan memasukkan persamaan 4-20 dan persamaan 4-22 ke dalam persamaan 4-12 didapatkan waktu tempuh KRL dalam sub periode perlambatan :

$$\begin{aligned} t_1 &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-846,411 + 5,4031v + 0,00063v^2} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 8576,19v - 1343509,524} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 153,894)(v + 8730,084)} \\ &= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(153,894 - v)(v + 8730,084)} \\ &= -11,25 \int \left(\frac{1}{153,894 - v} + \frac{1}{v + 8730,084} \right) dv \\ &= -11,25 (-\ln|153,894 - v| + \ln|v + 8730,084|) + C \end{aligned}$$

$$= -11,25 \ln \left| \frac{8730,084 + v}{153,894 - v} \right| + C \quad (4-23)$$

Dengan melihat kurva karakteristik pengereman pada gambar 4.8, maka dapat dilihat bahwa kecepatan akhir KRL yang mampu dicapai dengan kendali daya konstan adalah 60 km/h. Dapat dilihat pada tabel 4.14 bahwa dengan kondisi kemiringan rel 0 permil maka kecepatan puncak KRL pada kondisi percepatan adalah 112,214 km/h. Dengan memasukkan nilai kecepatan sebagai batas integrasi ke dalam persamaan 4-23, waktu tempuh KRL dalam sub periode perlambatan adalah :

$$t_1 = -11,25 \ln \left| \frac{8730,084 + v}{153,894 - v} \right|_{112,214}^{60}$$

$$= -11,25 (4,539 - 5,357)$$

$$= -11,25 (-0,818)$$

$$t_1 = 9,203 \text{ detik}$$

Untuk kondisi kedua dimana berlaku kendali torsi konstan, kurva karakteristik pada gambar 4.8 memberikan nilai gaya tarik KRL yang konstan selama sub periode percepatan dengan kecepatan antara 60 – 0 km/h sebesar :

$$F_t = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN} \quad (4-24)$$

Dengan memasukkan persamaan 4-20 dan persamaan 4-24 ke dalam persamaan 4-12 didapatkan waktu tempuh KRL dalam sub periode perlambatan :

$$t_2 = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-538,991 + 0,0311v + 0,00063v^2}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 49,365v - 855541,27}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 900,602)(v + 949,967)}$$

$$= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(900,602 - v)(v + 949,967)}$$

$$= -54,006 \int \left(\frac{1}{900,602 - v} + \frac{1}{v + 949,967} \right) dv$$

$$= -54,006 (-\ln|900,602 - v| + \ln|v + 949,967|) + C$$

$$= -54,006 \ln \left| \frac{949,967 + v}{900,602 - v} \right| + C$$

Dengan memasukkan batas integrasi yakni range kecepatan yang mampu dicapai oleh KRL ketika melakukan pengereman dengan kendali torsi konstan, maka diperoleh :

$$\begin{aligned} t_2 &= -54,006 \ln \left| \frac{949,967 + v}{900,602 - v} \right|_{60}^0 \\ &= -54,006 (0,053 - 0,184) \\ &= -54,006 (-0,131) \end{aligned}$$

$$t_2 = 7,075 \text{ detik}$$

Waktu tempuh yang diperlukan untuk menghentikan KRL pada sub periode perlambatan berdasarkan asumsi diatas adalah :

$$t = t_1 + t_2 = 9,203 + 7,075 = 16,278 \text{ detik}$$

Untuk menghitung perlambatan dapat mempergunakan persamaan 4-2 sebagai berikut :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{112,214 - 0}{16,278} = 6,894 \text{ km/h/det}$$

Kinerja KRL untuk berbagai kondisi kemiringan rel dapat dilihat pada tabel 4.17.

Tabel 4.17 Pengaruh Kemiringan Jalan Rel Terhadap Kinerja KRL VVVf Holec BN Pada Sub Periode Perlambatan

Gradien Kemiringan (%)	Waktu Perlambatan (detik)	Deakselerasi (km/h/det)
0	16,278	6,894
2,5	12,467	8,276
5	9,84	9,565
7,5	7,944	10,705
10	6,66	11,404
12,5	5,165	12,942
15	4,161	13,881
17,5	3,294	14,748
20	2,52	15,643
22,5	1,829	16,535
25	1,213	17,352

Sumber : Perhitungan

Berdasarkan tabel 4.17 dapat diketahui bahwa semakin tinggi gradien kemiringan jalan rel, maka waktu perlambatan KRL dan deakselerasi akan semakin

cepat. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh dari gaya gravitasi yang membantu proses perlambatan KRL. Selain itu semakin cepatnya waktu perlambatan dan deakselerasi KRL karena kecepatan maksimum yang harus diturunkan untuk mencapai kecepatan 0 km/h semakin kecil seiring dengan kenaikan gradien, seperti yang terlihat pada tabel 4.14.

4.6 Hasil Perbandingan Kinerja Kereta Rel Listrik (KRL)

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis pada sub bab sebelumnya, maka dapat diperoleh perbandingan kinerja dari masing-masing Kereta Rel Listrik (KRL) seperti dalam tabel 4.18 berikut.

Tabel 4.18 Perbandingan Kinerja Dari Masing-Masing Kereta Rel Listrik (KRL)

Perbandingan	KRL Rheostatik T6000	KRL VVVF Holec BN
Berat Total KRL	185,6 ton	226,65 ton
Daya Setiap Motor Traksi	100 kW	155 kW
Jumlah Motor Traksi Dalam 1 Set Kereta	16	8
Sub Periode Pengasutan :		
<ul style="list-style-type: none"> • Gaya Maksimum Pengasutan • Kecepatan Maksimum Pengasutan • Waktu Tempuh Untuk Mencapai Kecepatan Maksimum Pengasutan : <ul style="list-style-type: none"> ➢ Gradien Kemiringan 0 % ➢ Gradien Kemiringan 2,5 % ➢ Gradien Kemiringan 5 % ➢ Gradien Kemiringan 7,5 % ➢ Gradien Kemiringan 10 % ➢ Gradien Kemiringan 12,5 % ➢ Gradien Kemiringan 15 % ➢ Gradien Kemiringan 17,5 % ➢ Gradien Kemiringan 20 % ➢ Gradien Kemiringan 22,5 % ➢ Gradien Kemiringan 25 % • Akselerasi Untuk Mencapai Kecepatan Maksimum Pengasutan: <ul style="list-style-type: none"> ➢ Gradien Kemiringan 0 % ➢ Gradien Kemiringan 2,5 % 	<ul style="list-style-type: none"> 558,429 kN 28 km/h 2,615 detik 2,82 detik 3,098 detik 3,412 detik 3,826 detik 4,423 detik 5,123 detik 6,136 detik 7,538 detik 9,939 detik 14,43 detik 10,707 km/h/det 9,929 km/h/det 	<ul style="list-style-type: none"> 574 kN 30 km/h 3,307 detik 3,647 detik 4,094 detik 4,679 detik 5,44 detik 6,519 detik 8,054 detik 10,408 detik 15,047 detik 26,921 detik 130,273 detik 9,072 km/h/det 8,226 km/h/det

➤ Gradien Kemiringan 5 %	9,038 km/h/det	7,328 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 7,5 %	8,206 km/h/det	6,412 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 10 %	7,318 km/h/det	5,515 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 12,5 %	6,331 km/h/det	4,602 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 15 %	5,456 km/h/det	3,725 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 17,5 %	4,563 km/h/det	2,882 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 20 %	3,715 km/h/det	1,994 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 22,5 %	2,817 km/h/det	1,114 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 25 %	1,94 km/h/det	0,23 km/h/det
Sub Periode Percepatan :		
• Kecepatan Puncak Sub Periode Percepatan :		
➤ Gradien Kemiringan 0 %	97,24 km/h	112,214 km/h
➤ Gradien Kemiringan 2,5 %	89,573 km/h	103,174 km/h
➤ Gradien Kemiringan 5 %	78,058 km/h	94,117 km/h
➤ Gradien Kemiringan 7,5 %	74,201 km/h	85,044 km/h
➤ Gradien Kemiringan 10 %	66,496 km/h	75,953 km/h
➤ Gradien Kemiringan 12,5 %	58,778 km/h	66,846 km/h
➤ Gradien Kemiringan 15 %	51,048 km/h	57,757 km/h
➤ Gradien Kemiringan 17,5 %	43,305 km/h	48,579 km/h
➤ Gradien Kemiringan 20 %	35,549 km/h	39,42 km/h
➤ Gradien Kemiringan 22,5 %	27,779 km/h	30,243 km/h
➤ Gradien Kemiringan 25 %	19,997 km/h	21,048 km/h
• Akselerasi Untuk Mencapai Kec. Maksimum :		
➤ Gradien Kemiringan 0 %	1,393 km/h/det	0,709 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 2,5 %	1,269 km/h/det	0,636 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 5 %	1,069 km/h/det	0,563 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 7,5 %	1 km/h/det	0,489 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 10 %	0,861 km/h/det	0,415 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 12,5 %	0,718 km/h/det	0,339 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 15 %	0,572 km/h/det	0,262 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 17,5 %	0,412 km/h/det	0,182 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 20 %	0,241 km/h/det	0,099 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 22,5 %	-	-
➤ Gradien Kemiringan 25 %	-	-
• Waktu Tempuh Untuk Mencapai Kec. Maks :		
➤ Gradien Kemiringan 0 %	49,273 detik	115,978 detik
➤ Gradien Kemiringan 2,5 %	48,325 detik	114,983 detik
➤ Gradien Kemiringan 5 %	46,593 detik	113,84 detik
➤ Gradien Kemiringan 7,5 %	45,958 detik	112,464 detik
➤ Gradien Kemiringan 10 %	44,428 detik	110,805 detik

➤ Gradien Kemiringan 12,5 %	42,546 detik	108,725 detik
➤ Gradien Kemiringan 15 %	39,884 detik	105,994 detik
➤ Gradien Kemiringan 17,5 %	36,528 detik	102,017 detik
➤ Gradien Kemiringan 20 %	30,367 detik	95,135 detik
➤ Gradien Kemiringan 22,5 %	-	-
➤ Gradien Kemiringan 25 %	-	-
Sub Periode Perlambatan :		
• Deakselerasi :		
➤ Gradien Kemiringan 0 %	10,699 km/h/det	6,894 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 2,5 %	11,571 km/h/det	8,276 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 5 %	12,483 km/h/det	9,565 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 7,5 %	13,362 km/h/det	10,705 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 10 %	14,251 km/h/det	11,404 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 12,5 %	15,134 km/h/det	12,942 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 15 %	16,023 km/h/det	13,881 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 17,5 %	16,903 km/h/det	14,748 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 20 %	17,827 km/h/det	15,643 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 22,5 %	18,718 km/h/det	16,535 km/h/det
➤ Gradien Kemiringan 25 %	19,505 km/h/det	17,352 km/h/det
• Waktu Perlambatan :		
➤ Gradien Kemiringan 0 %	7,967 detik	16,278 detik
➤ Gradien Kemiringan 2,5 %	6,704 detik	12,467 detik
➤ Gradien Kemiringan 5 %	5,292 detik	9,84 detik
➤ Gradien Kemiringan 7,5 %	4,655 detik	7,944 detik
➤ Gradien Kemiringan 10 %	3,824 detik	6,66 detik
➤ Gradien Kemiringan 12,5 %	3,091 detik	5,165 detik
➤ Gradien Kemiringan 15 %	2,437 detik	4,161 detik
➤ Gradien Kemiringan 17,5 %	1,852 detik	3,294 detik
➤ Gradien Kemiringan 20 %	1,321 detik	2,52 detik
➤ Gradien Kemiringan 22,5 %	0,843 detik	1,829 detik
➤ Gradien Kemiringan 25 %	0,41 detik	1,213 detik

Sumber : Analisis Data

Dengan melihat tabel 4.18 dapat diketahui perbandingan kinerja KRL Rheostatik T6000 dan KRL VVVF Holec BN sebagai berikut :

1. Kedua jenis KRL layak untuk dioperasikan pada jalur rel Malang-Surabaya, karena kedua jenis KRL tersebut mempunyai torsi yang cukup untuk memikul beban berat total KRL sekaligus menempuh jalur Malang-Surabaya yang memiliki kondisi gradien kemiringan jalur tertinggi 25 permil, hal ini terlihat

dari kemampuan KRL untuk melakukan proses pengasutan sampai mencapai kecepatan 28 km/h untuk KRL Rheostatik T6000 dan 30 km/h untuk KRL VVVF Holec BN, kemudian dilanjutkan pada sub periode percepatan mampu meluncur hingga kecepatan maksimum 19,997 km/h untuk KRL Rheostatik T6000 dan 21,048 km/h untuk KRL VVVF Holec BN.

2. Pada sub periode pengasutan, KRL VVVF Holec BN mempunyai keunggulan dari segi gaya traksi pengasutan yang dihasilkan yang mencapai 574 kN sementara KRL Rheostatik T6000 mampu menghasilkan gaya traksi 558,429 kN. Walaupun selisih nilainya boleh dikatakan sedikit, namun apabila dipandang dari sisi berat total kereta, KRL VVVF Holec BN mempunyai berat total yang jauh lebih berat dibandingkan KRL Rheostatik T6000 yakni 226,65 ton sehingga KRL VVVF Holec BN unggul dari segi gaya traksi pengasutan yang dihasilkan.
3. Dengan gaya traksi pengasutan yang dihasilkan lebih tinggi dari KRL Rheostatik T6000, ternyata kinerja akselerasi KRL VVVF Holec BN lebih rendah baik pada sub periode pengasutan maupun sub periode percepatan, namun KRL VVVF Holec BN mempunyai keunggulan dalam mencapai kecepatan maksimum yang lebih tinggi dari KRL Rheostatik T6000 pada berbagai kondisi kemiringan rel. Adapun pada gradien kemiringan jalur rel diatas 20 permil baik KRL VVVF Holec BN maupun KRL Rheostatik T6000 tidak dapat melakukan percepatan.

Dalam hal proses perlambatan, KRL Rheostatik T6000 mempunyai keunggulan karena memiliki kemampuan deakselerasi yang lebih tinggi dari KRL VVVF Holec BN, sehingga waktu pengeremannya pun relatif lebih singkat.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa data pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan :

1. Motor listrik (motor traksi) pada penggunaannya dalam KRL memerlukan pengaturan kecepatan. Untuk KRL yang menggunakan motor traksi DC mempergunakan kontrol Rheostatik untuk pengaturan kecepatannya. Kontrol Rheostatik mengatur hubungan seri-paralel setiap 8 motor traksi dan pengaturan nilai tahanan mula untuk memperkecil arus pengasutan. Sementara untuk KRL yang menggunakan motor traksi AC mempergunakan kontrol VVVF untuk pengaturan kecepatannya. Dengan kontrol VVVF tegangan dan frekuensi dijaga konstan nilai perbandingannya sehingga dengan torsi konstan kecepatannya dapat berubah-ubah sesuai dengan kebutuhan.
2. KRL VVVF Holec BN mampu menghasilkan gaya tarik pengasutan 574 kN sementara KRL Rheostatik T6000 menghasilkan gaya tarik 558,429 kN. Oleh karenanya KRL VVVF Holec BN mempunyai keunggulan dari segi gaya traksi pengasutan yang dihasilkan.
3. Untuk sub periode pengasutan dan percepatan, KRL Rheostatik T6000 mempunyai keunggulan dalam hal akselerasi yang lebih cepat jika dibandingkan dengan KRL VVVF Holec BN namun dengan lebih besarnya nilai gaya traksi yang dihasilkan, KRL VVVF Holec BN ternyata memiliki kecepatan puncak yang lebih tinggi untuk setiap sub periodenya sehingga KRL VVVF unggul dalam hal kecepatan maksimum yang mampu dihasilkan.
4. Dalam hal proses perlambatan, KRL Rheostatik T6000 mempunyai keunggulan karena memiliki kemampuan deakselerasi yang lebih tinggi dari KRL VVVF Holec BN, sehingga waktu pengeremannya pun relatif lebih singkat.
5. Secara umum kedua jenis KRL layak untuk dioperasikan pada jalur kereta Surabaya-Malang, hal ini dapat dilihat dari adanya kemampuan dari masing-masing KRL untuk melakukan proses pengasutan pada gradien kemiringan 25 permil yang merupakan gradien kemiringan tertinggi pada jalur kereta Surabaya-Malang.

5.2 Saran

Sebagai bahan pertimbangan untuk PT Kereta Api sebagai operator perkeretaapian di Indonesia, sebaiknya dilakukan riset mendalam mengenai KRL seperti apa yang paling efisien dan baik untuk dioperasikan pada jalur kereta Malang-Surabaya tersebut, mengingat pada skripsi ini apa yang dibahas hanya berdasarkan data teknis dari KRL yang sudah ada dan kemudian diterapkan pada jalur Malang-Surabaya, sehingga tidak menutup kemungkinan mempergunakan KRL dari tipe yang lainnya atau bahkan dari tipe yang belum dioperasikan di Indonesia sekalipun.

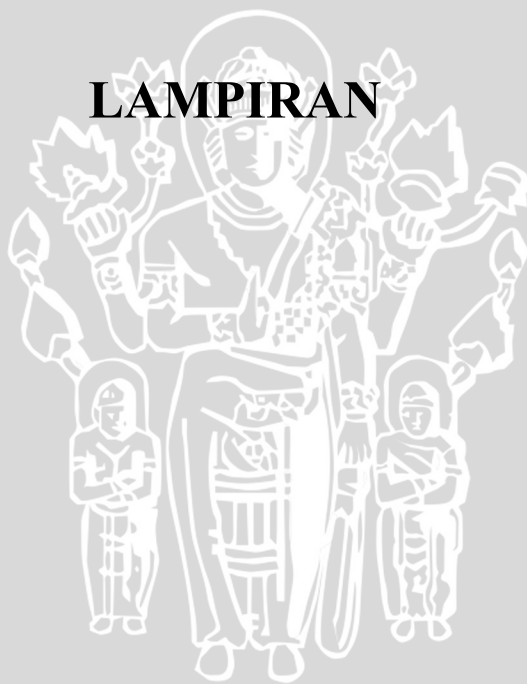


DAFTAR PUSTAKA

- BN/HOLEC. 1995. *Train Operating Manual Suburban Commuter Train For The Jabotabek Area*. Brussels : Bombardier BN
- Dimjati, Farid Mirza. 1990. *Studi Kesesuaian Motor Induksi Sebagai Motor Traksi Pada Kereta Rel Listrik, Skripsi Tidak Diterbitkan*. Malang : Jurusan Teknik Elektro FT Unibraw.
- Direktorat Jenderal Perkeretaapian. 2006. *Grafik Perjalanan Kereta Api Blitar – Malang – Wonokromo*. Bandung : Departemen Perhubungan.
- Japan Railway Technical Service. 1968. *Outline of Electric Car Type 6000 Book no 1*. Tokyo : Overseas Project Management Consultants, Ltd.
- Kadir, Abdul. 2003. *Mesin Induksi*. Jakarta : Penerbit Djambatan.
- Mohan, Ned, Undeland, Tore M and William Robbins. 1989. *Power Electronics : Converters, Application and Design*. New York : John Willey and Sons.
- Pillai, S.K. 1982. *A First Course On Electrical Drives*. New Delhi : Wiley Eastern Limited.
- PT Pindad. 1994. *Motor Traksi*. Bandung : PT Pindad.
- Rashid, Muhammad H. 1988. *Power Electronics Circuit, Devices and Applications*. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc.
- Santoso. 2000. *Diktat Petunjuk Kendali KRL VVVF Hitachi*. Bekasi : Balai Pendidikan dan Latihan Teknik Perkeretaapian.
- Sen, PC. 1989. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. New York : John Willey and Sons.
- Soemarwanto. 1988. *Diktat Teknik Tenaga Listrik*. Malang : Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Suwarmahatika, DP. 2006. *Simulasi Unjuk Kerja Motor Induksi Dengan Pengendalian Tegangan dan Frekuensi Menggunakan Inverter Bermodulasi Lebar Pulsa, Skripsi Tidak Diterbitkan*. Malang : Jurusan Teknik Elektro FT Unibraw.
- Theraja, B.L. and A.K. Theraja. 1991. *A Text Book of Electrical Technology*. New Delhi : Nirja Construction & Development Co(P) Ltd.
- Uppal, S.L. 1989. *Electrical Power*. Delhi : Khanna Publishers.
- Zemansky, Sears. 1994. *Fisika Untuk Univesitas I*. Jakarta : Bina Cipta.
- Zuhal. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung : Penerbit ITB.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN



LAMPIRAN 1

Listing Program Matlab

1. Simulasi Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Dengan Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni.

```
clear;
clf;
R1=0.46;
X1=2.7963;
Xm=10.9025;
R2=2.414;
X2=2.7963;
V=1716/sqrt(3);p=4;f=56;
ns=1680;ws=175.84;Pfw=189.2373;
Zab=j*Xm*(R1+j*X1)/(R1+j*(Xm+X1));
Rab=real(Zab);Xab=imag(Zab);
Vab=abs(V*(j*Xm/(R1+j*(Xm+X1))));

s=(0:.01:10)/10;
s(1)=0.001;
nm=(1-s)*ns;
for ii=1:1001
    Zr(ii)=j*Xm*((R2/s(ii))+j*X2)/((R2/s(ii))+j*(Xm+X2));
    R(ii)=real(Zr(ii));X(ii)=imag(Zr(ii));
    Zs(ii)=(R1+R(ii))+j*(X1+X(ii));
    I1(ii)=V/Zs(ii);
    I2(ii)=Vab/sqrt((Rab+R2/s(ii))^2+(Xab+X2)^2);
    Tm(ii)=(3*(Vab^2)*R2/s(ii))/(ws*((Rab+R2/s(ii))^2+(Xab+X2)^2));
end

subplot(2,1,1),plot(nm,Tm);
hold on;

xlabel('Putaran,rpm'),ylabel('Torsi Mekanik,Nm');
grid on;
hold off;
```

2. Simulasi Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Dengan Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni Variabel dan Frekuensi Konstan 56 Hz.

```
clear;
clf;
R1=0.46;
X1=2.7963;
Xm=10.9025;
R2=2.414;
X2=2.7963;
V=1716/sqrt(3);p=4;f=56;
ns=1680;ws=175.84;
Zab=j*Xm*(R1+j*X1)/(R1+j*(Xm+X1));
Rab=real(Zab);Xab=imag(Zab);
Vab=abs(V*(j*Xm/(R1+j*(Xm+X1))));
V1=1950/sqrt(3);
f1=56;
a=f1/f;
```

```

ns1=(120*f1)/p;ws1=6.28*ns1/60;
X11=a*X1;
X21=a*X2;
Xm1=a*Xm;
Zab1=j*Xm1*(R1+j*X11)/(R1+j*(Xm1+X11));
Rab1=real(Zab1);Xab1=imag(Zab1);
Vab1=abs(V1*(j*Xm1/(R1+j*(Xm1+X11))));
sm1=R2/sqrt((Rab1)^2+(Xab1+X21)^2);
V2=930/sqrt(3);
p=4;
f2=56;
b=f2/f;
ns2=(120*f2)/p;ws2=(6.28*ns2)/60;
X12=b*X1;
X22=b*X2;
Xm2=b*Xm;
Zab2=j*Xm2*(R1+j*X12)/(R1+j*(Xm2+X12));
Rab2=real(Zab2);Xab2=imag(Zab2);
Vab2=abs(V2*(j*Xm2/(R1+j*(Xm2+X12))));

s=(0:.01:10)/10;
s(1)=0.001;
nm=(1-s)*ns;
nm1=(1-s)*ns1;
nm2=(1-s)*ns2;
for ii=1:1001
    Zr(ii)=j*Xm*((R2/s(ii))+j*X2)/((R2/s(ii))+j*(Xm+X2));
    R(ii)=real(Zr(ii));X(ii)=imag(Zr(ii));
    Zs(ii)=(R1+R(ii))+j*(X1+X(ii));
    I1(ii)=V/Zs(ii);
    I2(ii)=Vab/sqrt((Rab+R2/s(ii))^2+(Xab+X2)^2);
    Zra(ii)=j*Xm1*((R2/s(ii))+j*X21)/((R2/s(ii))+j*(Xm1+X21));
    Ra(ii)=real(Zra(ii));Xa(ii)=imag(Zra(ii));
    Zsa(ii)=(R1+Ra(ii))+j*(X11+Xa(ii));
    I1a(ii)=V1/Zsa(ii);
    I2a(ii)=Vab1/sqrt((Rab1+R2/s(ii))^2+(Xab1+X21)^2);
    Zrb(ii)=j*Xm2*((R2/s(ii))+j*X22)/((R2/s(ii))+j*(Xm2+X22));
    Rb(ii)=real(Zrb(ii));Xb(ii)=imag(Zrb(ii));
    Zsb(ii)=(R1+Rb(ii))+j*(X12+Xb(ii));
    I1b(ii)=V2/Zsb(ii);
    I2b(ii)=Vab2/sqrt((Rab2+R2/s(ii))^2+(Xab2+X22)^2);
    Tm(ii)=(3*(Vab^2)*R2/s(ii))/(ws*((Rab+R2/s(ii))^2+(Xab+X2)^2));
    Tm1(ii)=(3*(Vab1^2)*R2/s(ii))/(ws1*((Rab1+R2/s(ii))^2+(Xab1+X21)^2));
    Tm2(ii)=(3*(Vab2^2)*R2/s(ii))/(ws2*((Rab2+R2/s(ii))^2+(Xab2+X22)^2));
end

subplot(2,1,1),plot(nm,Tm);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm1,Tm1);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm2,Tm2);
hold on;
xlabel('Putaran,rpm'),ylabel('Torsi Mekanik,Nm');

grid on;
hold off;

```


3. Simulasi Karakteristik Torsi Mekanik Fungsi Putaran Motor Traksi KRL VVVF Holec BN Dengan Menggunakan Sumber Tegangan Sinusoida Murni Konstan 1716 V dan Frekuensi Variabel.

```

clear;
clf;
R1=0.46;
X1=2.7963;
Xm=10.9025;
R2=2.414;
X2=2.7963;
V=1716/sqrt(3);p=4;f=56;
ns=1680;ws=175.84;Pfw=189.2373;
Zab=j*Xm*(R1+j*X1)/(R1+j*(Xm+X1));
Rab=real(Zab);Xab=imag(Zab);
Vab=abs(V*(j*Xm/(R1+j*(Xm+X1))));
V1=1716/sqrt(3);
f1=70;
a=f1/f;
ns1=(120*f1)/p;ws1=6.28*ns1/60;
X11=a*X1;
X21=a*X2;
Xm1=a*Xm;
Zab1=j*Xm1*(R1+j*X11)/(R1+j*(Xm1+X11));
Rab1=real(Zab1);Xab1=imag(Zab1);
Vab1=abs(V1*(j*Xm1/(R1+j*(Xm1+X11))));
sm1=R2/sqrt((Rab1)^2+(Xab1+X21)^2);
V2=1716/sqrt(3);
p=4;
f2=45;
b=f2/f;
ns2=(120*f2)/p;ws2=(6.28*ns2)/60;
X12=b*X1;
X22=b*X2;
Xm2=b*Xm;
Zab2=j*Xm2*(R1+j*X12)/(R1+j*(Xm2+X12));
Rab2=real(Zab2);Xab2=imag(Zab2);
Vab2=abs(V2*(j*Xm2/(R1+j*(Xm2+X12))));

s=(0:.01:10)/10;
s(1)=0.001;
nm=(1-s)*ns;
nm1=(1-s)*ns1;
nm2=(1-s)*ns2;
for ii=1:1001
    Zr(ii)=j*Xm*((R2/s(ii))+j*X2)/((R2/s(ii))+j*(Xm+X2));
    R(ii)=real(Zr(ii));X(ii)=imag(Zr(ii));
    Zs(ii)=(R1+R(ii))+j*(X1+X(ii));
    I1(ii)=V/Zs(ii);
    I2(ii)=Vab/sqrt((Rab+R2/s(ii))^2+(Xab+X2)^2);
    Zra(ii)=j*Xm1*((R2/s(ii))+j*X21)/((R2/s(ii))+j*(Xm1+X21));
    Ra(ii)=real(Zra(ii));Xa(ii)=imag(Zra(ii));
    Zsa(ii)=(R1+Ra(ii))+j*(X11+Xa(ii));
    I1a(ii)=V1/Zsa(ii);
    I2a(ii)=Vab1/sqrt((Rab1+R2/s(ii))^2+(Xab1+X21)^2);
    Zrb(ii)=j*Xm2*((R2/s(ii))+j*X22)/((R2/s(ii))+j*(Xm2+X22));
    Rb(ii)=real(Zrb(ii));Xb(ii)=imag(Zrb(ii));
    Zsb(ii)=(R1+Rb(ii))+j*(X12+Xb(ii));
    I1b(ii)=V2/Zsb(ii);

```

```

I2b(ii)=Vab2/sqrt((Rab2+R2/s(ii))^2+(Xab2+X22)^2);
Tm(ii)=(3*(Vab^2)*R2/s(ii))/(ws*((Rab+R2/s(ii))^2+(Xab+X2)^2));
Tm1(ii)=(3*(Vab1^2)*R2/s(ii))/(ws1*((Rab1+R2/s(ii))^2+(Xab1+X21)^2));
Tm2(ii)=(3*(Vab2^2)*R2/s(ii))/(ws2*((Rab2+R2/s(ii))^2+(Xab2+X22)^2));
end

```

```

subplot(2,1,1),plot(nm,Tm);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm1,Tm1);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm2,Tm2);
hold on;
xlabel('Putaran,rpm'),ylabel('Torsi Mekanik,Nm');

```

```

grid on;
hold off;

```

4. Simulasi Pengaturan Perbandingan Tegangan dan Frekuensi Inverter

```

clear;
clf;
R1=0.46;
X1=2.7963;
Xm=10.9025;
R2=2.414;
X2=2.7963;
V1=1950/sqrt(3);p=4;f=56;fs=36;
a=fs/f;
ns=(120*fs)/p;
ws=(6.28*ns)/60;
X1s=a*X1;
X2s=a*X2;
Xms=a*Xm;
Zab=j*Xms*(R1+j*X1s)/(R1+j*(Xms+X1s));
Rab=real(Zab);Xab=imag(Zab);
sm=R2/sqrt((Rab)^2+(Xab+X2s)^2);
Tmax=993.7427;
Tb=(3*R2/sm)/(ws*((Rab+R2/sm)^2+(Xab+X2s)^2));
Vab=sqrt(Tmax/Tb);
Vs=((sqrt((R1)^2+(X1+Xm)^2))/Xm)*Vab*sqrt(3)

```

5. Simulasi Unjuk Kerja Sistem Traksi KRL VVVF Holec BN

```

clear;
clf;
R1=0.46;
X1=2.7963;
Xm=10.9025;
R2=2.414;
X2=2.7963;
V=1716/sqrt(3);p=4;f=56;
ns=1680;ws=175.84;
Zab=j*Xm*(R1+j*X1)/(R1+j*(Xm+X1));
Rab=real(Zab);Xab=imag(Zab);
Vab=abs(V*(j*Xm/(R1+j*(Xm+X1))));

```

```

V1=1419/sqrt(3);
f1=46;
a=f1/f;
ns1=(120*f1)/p;ws1=6.28*ns1/60;
X11=a*X1;

```


$X_{21}=a*X_2;$
 $X_{m1}=a*X_m;$
 $Z_{ab1}=j*X_{m1}*(R_1+j*X_{11})/(R_1+j*(X_{m1}+X_{11}));$
 $R_{ab1}=\text{real}(Z_{ab1});X_{ab1}=\text{imag}(Z_{ab1});$
 $V_{ab1}=\text{abs}(V_1*(j*X_{m1}/(R_1+j*(X_{m1}+X_{11}))));$
 $sm_1=R_2/\text{sqrt}((R_{ab1})^2+(X_{ab1}+X_{21})^2);$

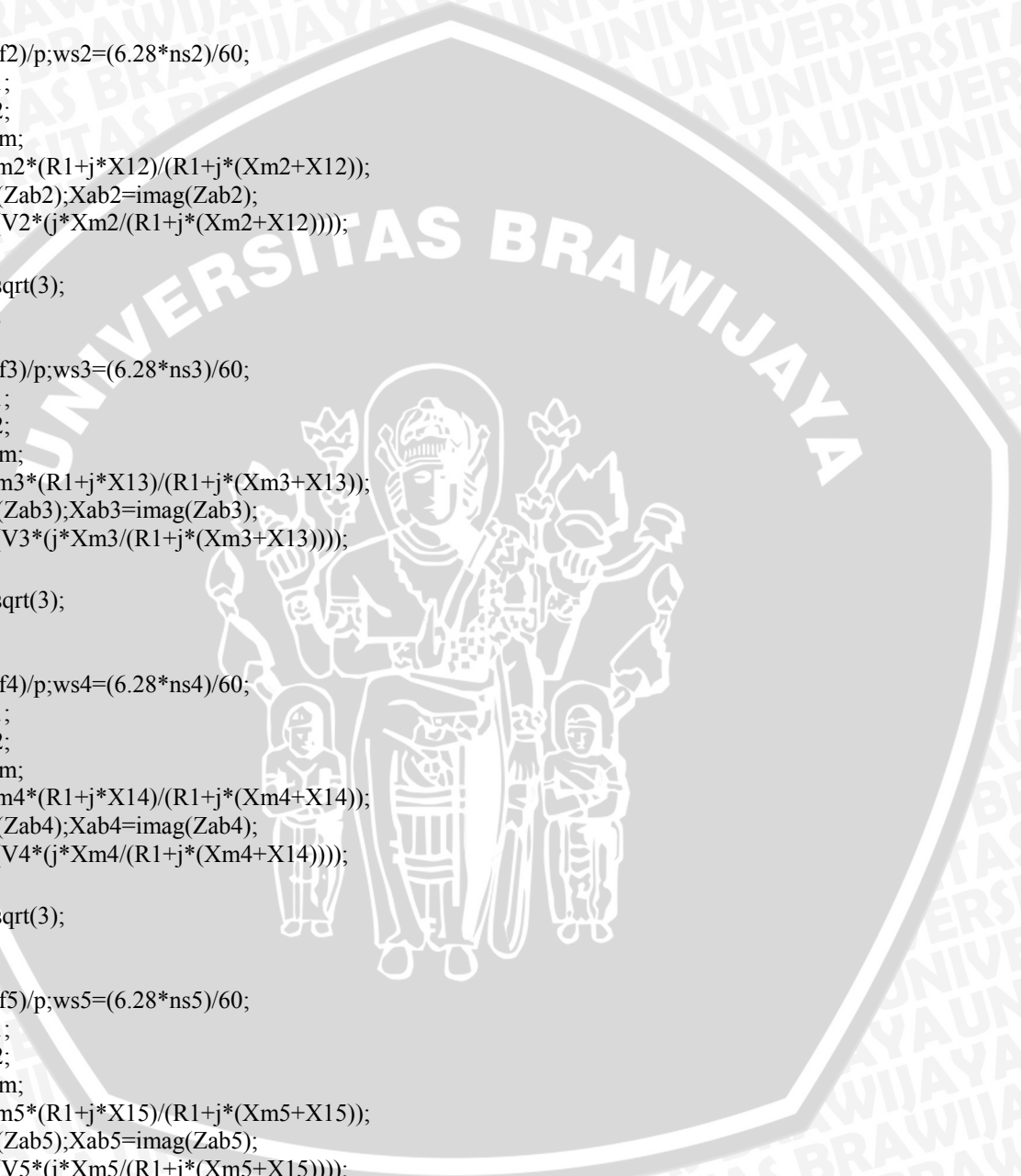
$V_2=1122.3/\text{sqrt}(3);$
 $f_2=36;$
 $b=f_2/f;$
 $ns_2=(120*f_2)/p;ws_2=(6.28*ns_2)/60;$
 $X_{12}=b*X_1;$
 $X_{22}=b*X_2;$
 $X_{m2}=b*X_m;$
 $Z_{ab2}=j*X_{m2}*(R_1+j*X_{12})/(R_1+j*(X_{m2}+X_{12}));$
 $R_{ab2}=\text{real}(Z_{ab2});X_{ab2}=\text{imag}(Z_{ab2});$
 $V_{ab2}=\text{abs}(V_2*(j*X_{m2}/(R_1+j*(X_{m2}+X_{12}))));$

$V_3=1950/\text{sqrt}(3);$
 $f_3=63.875;$
 $b=f_3/f;$
 $ns_3=(120*f_3)/p;ws_3=(6.28*ns_3)/60;$
 $X_{13}=b*X_1;$
 $X_{23}=b*X_2;$
 $X_{m3}=b*X_m;$
 $Z_{ab3}=j*X_{m3}*(R_1+j*X_{13})/(R_1+j*(X_{m3}+X_{13}));$
 $R_{ab3}=\text{real}(Z_{ab3});X_{ab3}=\text{imag}(Z_{ab3});$
 $V_{ab3}=\text{abs}(V_3*(j*X_{m3}/(R_1+j*(X_{m3}+X_{13}))));$

$V_4=1950/\text{sqrt}(3);$
 $f_4=73;$
 $b=f_4/f;$
 $ns_4=(120*f_4)/p;ws_4=(6.28*ns_4)/60;$
 $X_{14}=b*X_1;$
 $X_{24}=b*X_2;$
 $X_{m4}=b*X_m;$
 $Z_{ab4}=j*X_{m4}*(R_1+j*X_{14})/(R_1+j*(X_{m4}+X_{14}));$
 $R_{ab4}=\text{real}(Z_{ab4});X_{ab4}=\text{imag}(Z_{ab4});$
 $V_{ab4}=\text{abs}(V_4*(j*X_{m4}/(R_1+j*(X_{m4}+X_{14}))));$

$V_5=1950/\text{sqrt}(3);$
 $f_5=83;$
 $b=f_5/f;$
 $ns_5=(120*f_5)/p;ws_5=(6.28*ns_5)/60;$
 $X_{15}=b*X_1;$
 $X_{25}=b*X_2;$
 $X_{m5}=b*X_m;$
 $Z_{ab5}=j*X_{m5}*(R_1+j*X_{15})/(R_1+j*(X_{m5}+X_{15}));$
 $R_{ab5}=\text{real}(Z_{ab5});X_{ab5}=\text{imag}(Z_{ab5});$
 $V_{ab5}=\text{abs}(V_5*(j*X_{m5}/(R_1+j*(X_{m5}+X_{15}))));$

$V_6=1950/\text{sqrt}(3);$
 $f_6=93;$
 $b=f_6/f;$
 $ns_6=(120*f_6)/p;ws_6=(6.28*ns_6)/60;$
 $X_{16}=b*X_1;$
 $X_{26}=b*X_2;$
 $X_{m6}=b*X_m;$
 $Z_{ab6}=j*X_{m6}*(R_1+j*X_{16})/(R_1+j*(X_{m6}+X_{16}));$



Rab6=real(Zab6);Xab6=imag(Zab6);
Vab6=abs(V6*(j*Xm6/(R1+j*(Xm6+X16))));

V7=1950/sqrt(3);
f7=103;
b=f7/f;
ns7=(120*f7)/p;ws7=(6.28*ns7)/60;
X17=b*X1;
X27=b*X2;
Xm7=b*Xm;
Zab7=j*Xm7*(R1+j*X17)/(R1+j*(Xm7+X17));
Rab7=real(Zab7);Xab7=imag(Zab7);
Vab7=abs(V7*(j*Xm7/(R1+j*(Xm7+X17))));

V8=1950/sqrt(3);
f8=113;
b=f8/f;
ns8=(120*f8)/p;ws8=(6.28*ns8)/60;
X18=b*X1;
X28=b*X2;
Xm8=b*Xm;
Zab8=j*Xm8*(R1+j*X18)/(R1+j*(Xm8+X18));
Rab8=real(Zab8);Xab8=imag(Zab8);
Vab8=abs(V8*(j*Xm8/(R1+j*(Xm8+X18))));

V9=1950/sqrt(3);
f9=123;
b=f9/f;
ns9=(120*f9)/p;ws9=(6.28*ns9)/60;
X19=b*X1;
X29=b*X2;
Xm9=b*Xm;
Zab9=j*Xm9*(R1+j*X19)/(R1+j*(Xm9+X19));
Rab9=real(Zab9);Xab9=imag(Zab9);
Vab9=abs(V9*(j*Xm9/(R1+j*(Xm9+X19))));

V10=1950/sqrt(3);
f10=133;
b=f10/f;
ns10=(120*f10)/p;ws10=(6.28*ns10)/60;
X110=b*X1;
X210=b*X2;
Xm10=b*Xm;
Zab10=j*Xm10*(R1+j*X110)/(R1+j*(Xm10+X110));
Rab10=real(Zab10);Xab10=imag(Zab10);
Vab10=abs(V10*(j*Xm10/(R1+j*(Xm10+X110))));

s=(0:01:10)/10;
s(1)=0.001;
nm=(1-s)*ns;
nm1=(1-s)*ns1;
nm2=(1-s)*ns2;
nm3=(1-s)*ns3;
nm4=(1-s)*ns4;
nm5=(1-s)*ns5;
nm6=(1-s)*ns6;
nm7=(1-s)*ns7;
nm8=(1-s)*ns8;
nm9=(1-s)*ns9;

nm10=(1-s)*ns10;
for ii=1:1001

Zr(ii)=j*Xm*((R2/s(ii))+j*X2)/((R2/s(ii))+j*(Xm+X2));
R(ii)=real(Zr(ii));X(ii)=imag(Zr(ii));
Zs(ii)=(R1+R(ii))+j*(X1+X(ii));
I1(ii)=V/Zs(ii);
I2(ii)=Vab/sqrt((Rab+R2/s(ii))^2+(Xab+X2)^2);

Zra(ii)=j*Xm1*((R2/s(ii))+j*X21)/((R2/s(ii))+j*(Xm1+X21));
Ra(ii)=real(Zra(ii));Xa(ii)=imag(Zra(ii));
Zsa(ii)=(R1+Ra(ii))+j*(X11+Xa(ii));
I1a(ii)=V1/Zsa(ii);
I2a(ii)=Vab1/sqrt((Rab1+R2/s(ii))^2+(Xab1+X21)^2);

Zrb(ii)=j*Xm2*((R2/s(ii))+j*X22)/((R2/s(ii))+j*(Xm2+X22));
Rb(ii)=real(Zrb(ii));Xb(ii)=imag(Zrb(ii));
Zsb(ii)=(R1+Rb(ii))+j*(X12+Xb(ii));
I1b(ii)=V2/Zsb(ii);
I2b(ii)=Vab2/sqrt((Rab2+R2/s(ii))^2+(Xab2+X22)^2);

Zrc(ii)=j*Xm3*((R2/s(ii))+j*X23)/((R2/s(ii))+j*(Xm3+X23));
Rc(ii)=real(Zrc(ii));Xc(ii)=imag(Zrc(ii));
Zsc(ii)=(R1+Rc(ii))+j*(X13+Xc(ii));
I1c(ii)=V2/Zsc(ii);
I2c(ii)=Vab3/sqrt((Rab3+R2/s(ii))^2+(Xab3+X23)^2);

Zrd(ii)=j*Xm4*((R2/s(ii))+j*X24)/((R2/s(ii))+j*(Xm4+X24));
Rd(ii)=real(Zrd(ii));Xd(ii)=imag(Zrd(ii));
Zsd(ii)=(R1+Rd(ii))+j*(X14+Xd(ii));
I1d(ii)=V2/Zsd(ii);
I2d(ii)=Vab4/sqrt((Rab4+R2/s(ii))^2+(Xab4+X24)^2);

Zre(ii)=j*Xm5*((R2/s(ii))+j*X25)/((R2/s(ii))+j*(Xm5+X25));
Re(ii)=real(Zre(ii));Xe(ii)=imag(Zre(ii));
Zse(ii)=(R1+Re(ii))+j*(X15+Xe(ii));
I1e(ii)=V2/Zse(ii);
I2e(ii)=Vab5/sqrt((Rab5+R2/s(ii))^2+(Xab5+X25)^2);

Zrf(ii)=j*Xm6*((R2/s(ii))+j*X26)/((R2/s(ii))+j*(Xm6+X26));
Rf(ii)=real(Zrf(ii));Xf(ii)=imag(Zrf(ii));
Zsf(ii)=(R1+Rf(ii))+j*(X16+Xf(ii));
I1f(ii)=V2/Zsf(ii);
I2f(ii)=Vab6/sqrt((Rab6+R2/s(ii))^2+(Xab6+X26)^2);

Zrg(ii)=j*Xm7*((R2/s(ii))+j*X27)/((R2/s(ii))+j*(Xm7+X27));
Rg(ii)=real(Zrg(ii));Xg(ii)=imag(Zrg(ii));
Zsg(ii)=(R1+Rg(ii))+j*(X17+Xg(ii));
I1g(ii)=V2/Zsg(ii);
I2g(ii)=Vab7/sqrt((Rab7+R2/s(ii))^2+(Xab7+X27)^2);

Zrh(ii)=j*Xm8*((R2/s(ii))+j*X28)/((R2/s(ii))+j*(Xm8+X28));
Rh(ii)=real(Zrh(ii));Xh(ii)=imag(Zrh(ii));
Zsh(ii)=(R1+Rh(ii))+j*(X18+Xh(ii));
I1h(ii)=V2/Zsh(ii);
I2h(ii)=Vab8/sqrt((Rab8+R2/s(ii))^2+(Xab8+X28)^2);

Zri(ii)=j*Xm9*((R2/s(ii))+j*X29)/((R2/s(ii))+j*(Xm9+X29));
Ri(ii)=real(Zri(ii));Xi(ii)=imag(Zri(ii));

$$\begin{aligned} Z_{si}(ii) &= (R1 + Ri(ii)) + j * (X19 + Xi(ii)); \\ I1i(ii) &= V2 / Z_{si}(ii); \\ I2i(ii) &= Vab9 / \sqrt{((Rab9 + R2/s(ii))^2 + (Xab9 + X29)^2)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{rj}(ii) &= j * X_{m10} * ((R2/s(ii)) + j * X_{210}) / ((R2/s(ii)) + j * (X_{m10} + X_{210})); \\ R_{j}(ii) &= \text{real}(Z_{rj}(ii)); X_{j}(ii) = \text{imag}(Z_{rj}(ii)); \\ Z_{sj}(ii) &= (R1 + R_{j}(ii)) + j * (X_{110} + X_{j}(ii)); \\ I1j(ii) &= V2 / Z_{sj}(ii); \\ I2j(ii) &= Vab10 / \sqrt{((Rab10 + R2/s(ii))^2 + (Xab10 + X_{210})^2)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{m}(ii) &= (3 * (Vab^2 * R2/s(ii)) / (ws * ((Rab + R2/s(ii))^2 + (Xab + X2)^2)); \\ T_{m1}(ii) &= (3 * (Vab1^2 * R2/s(ii)) / (ws1 * ((Rab1 + R2/s(ii))^2 + (Xab1 + X21)^2)); \\ T_{m2}(ii) &= (3 * (Vab2^2 * R2/s(ii)) / (ws2 * ((Rab2 + R2/s(ii))^2 + (Xab2 + X22)^2)); \\ T_{m3}(ii) &= (3 * (Vab3^2 * R2/s(ii)) / (ws3 * ((Rab3 + R2/s(ii))^2 + (Xab3 + X23)^2)); \\ T_{m4}(ii) &= (3 * (Vab4^2 * R2/s(ii)) / (ws4 * ((Rab4 + R2/s(ii))^2 + (Xab4 + X24)^2)); \\ T_{m5}(ii) &= (3 * (Vab5^2 * R2/s(ii)) / (ws5 * ((Rab5 + R2/s(ii))^2 + (Xab5 + X25)^2)); \\ T_{m6}(ii) &= (3 * (Vab6^2 * R2/s(ii)) / (ws6 * ((Rab6 + R2/s(ii))^2 + (Xab6 + X26)^2)); \\ T_{m7}(ii) &= (3 * (Vab7^2 * R2/s(ii)) / (ws7 * ((Rab7 + R2/s(ii))^2 + (Xab7 + X27)^2)); \\ T_{m8}(ii) &= (3 * (Vab8^2 * R2/s(ii)) / (ws8 * ((Rab8 + R2/s(ii))^2 + (Xab8 + X28)^2)); \\ T_{m9}(ii) &= (3 * (Vab9^2 * R2/s(ii)) / (ws9 * ((Rab9 + R2/s(ii))^2 + (Xab9 + X29)^2)); \\ T_{m10}(ii) &= (3 * (Vab10^2 * R2/s(ii)) / (ws10 * ((Rab10 + R2/s(ii))^2 + (Xab10 + X210)^2)); \end{aligned}$$

end

```
subplot(2,1,1),plot(nm,Tm);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm1,Tm1);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm2,Tm2);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm3,Tm3);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm4,Tm4);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm5,Tm5);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm6,Tm6);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm7,Tm7);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm8,Tm8);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm9,Tm9);
hold on;
subplot(2,1,1),plot(nm10,Tm10);
hold on;
xlabel('Putaran,rpm'),ylabel('Torsi Mekanik,Nm');
grid on;
hold off;
```



LAMPIRAN 2

Analisis Data Perhitungan KRL Rheostatik T6000

1. Analisis Data Pengaruh Kemiringan Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Pengasutan

Kemiringan 2,5%

$$\begin{aligned}F_{rg} &= F_r + F_g \\&= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\&= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 2,5))/1000 \\&= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 45472)/1000 \\&= 48,7192 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\&= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{509,71 - 0,02549v - 0,00063v^2} \\&= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 40,4603v + 809063,492} \\&= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(879,477 - v)(v + 919,937)} \\&= 45,482 \int \left(\frac{1}{879,477 - v} + \frac{1}{v + 919,937} \right) dv \\&= 45,482 (-\ln|879,477 - v| + \ln|v + 919,937|) + C \\&= 45,482 \ln \left| \frac{919,937 + v}{879,477 - v} \right| + C\end{aligned}$$

$$t = 45,482 \ln \left| \frac{919,937 + v}{879,477 - v} \right|_0^{28}$$

$$= 45,482 (0,107 - 0,045)$$

$$= 45,482 (0,062)$$

$$t = 2,82 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{2,82} = 9,929 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 5 %**

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\ &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 5))/1000 \\ &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 90944)/1000 \\ &= 94,191 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{464,238 - 0,02549v - 0,00063v^2} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 40,4603v + 736885,714} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(838,429 - v)(v + 878,889)} \\ &= 47,656 \int \left(\frac{1}{838,429 - v} + \frac{1}{v + 878,889} \right) dv \\ &= 47,656 (-\ln|838,429 - v| + \ln|v + 878,889|) + C \\ &= 47,656 \ln \left| \frac{878,889 + v}{838,429 - v} \right| + C \end{aligned}$$

$$t = 47,656 \ln \left| \frac{878,889 + v}{838,429 - v} \right|_0^{28}$$

$$= 47,656 (0,112 - 0,047)$$

$$= 47,656 (0,065)$$

$$t = 3,098 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{3,098} = 9,038 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 7,5 %**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 7,5))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 136416)/1000 \\
 &= 139,663 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{418,766 - 0,02549v - 0,00063v^2}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 40,4603v + 664707,937}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(795,317 - v)(v + 835,777)}$$

$$= 50,176 \int \left(\frac{1}{795,317 - v} + \frac{1}{v + 835,777} \right) dv$$

$$= 50,176 (-\ln|795,317 - v| + \ln|v + 835,777|) + C$$

$$= 50,176 \ln \left| \frac{835,777 + v}{795,317 - v} \right| + C$$

$$t = 50,176 \ln \left| \frac{835,777 + v}{795,317 - v} \right|_0^{28}$$

$$= 50,176 (0,118 - 0,05)$$

$$= 50,176 (0,068)$$

$$t = 3,412 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{3,412} = 8,206 \text{ km/h/detik}$$

• **Kemiringan 10%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 10))/1000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 181888)/1000 \\
 &= 185,135 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \\
 F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN} \\
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{373,294 - 0,02549v - 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 40,4603v + 592530,159} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(749,795 - v)(v + 790,256)} \\
 &= 53,142 \int \left(\frac{1}{749,795 - v} + \frac{1}{v + 790,256} \right) dv \\
 &= 53,142 (-\ln|749,795 - v| + \ln|v + 790,256|) + C \\
 &= 53,142 \ln \left| \frac{790,256 + v}{749,795 - v} \right| + C \\
 t &= 53,142 \ln \left| \frac{790,256 + v}{749,795 - v} \right|_0^{28} \\
 &= 53,142 (0,125 - 0,053) \\
 &= 53,142 (0,072) \\
 t &= 3,826 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{3,826} = 7,318 \text{ km/h/detik}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 12,5%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m} G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 12,5))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 227360)/1000 \\
 &= 230,607 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$



$$\begin{aligned}
t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
&= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{327,822 - 0,02549v - 0,00063v^2} \\
&= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{-v^2 - 40,4603v + 520352,381} \\
&= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{(701,408 - v)(v + 741,868)} \\
&= 56,705 \int \left(\frac{1}{701,408 - v} + \frac{1}{v + 741,868} \right) dv \\
&= 56,705 (-\ln|701,408 - v| + \ln|v + 741,868|) + C \\
&= 56,705 \ln \left| \frac{741,868 + v}{701,408 - v} \right| + C
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t &= 56,705 \ln \left| \frac{741,868 + v}{701,408 - v} \right|_0^{28} \\
&= 56,705 (0,134 - 0,056) \\
&= 56,705 (0,078)
\end{aligned}$$

$$t = 4,423 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{4,423} = 6,331 \text{ km/h/detik}$$

- Kemiringan 15%**

$$\begin{aligned}
F_{rg} &= F_r + F_g \\
&= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m} G))/1000 \\
&= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 15))/1000 \\
&= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 272832)/1000 \\
&= 276,079 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
\end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
&= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{282,35 - 0,02549v - 0,00063v^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{-v^2 - 40,4603v + 448174,603} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{(649,534 - v)(v + 689,994)} \\
 &= 61,097 \int \left(\frac{1}{649,534 - v} + \frac{1}{v + 689,994} \right) dv \\
 &= 61,097 (-\ln|649,534 - v| + \ln|v + 689,994|) + C \\
 &= 61,097 \ln \left| \frac{689,994 + v}{649,534 - v} \right| + C \\
 t &= 61,097 \ln \left| \frac{689,994 + v}{649,534 - v} \right|_0^{28} \\
 &= 61,097 (0,144 - 0,06) \\
 &= 61,097 (0,084) \\
 t &= 5,132 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{5,132} = 5,456 \text{ km/h/det}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 17,5%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 17,5))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 318304)/1000 \\
 &= 321,551 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{236,878 - 0,02549v - 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{-v^2 - 40,4603v + 375996,825} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{(593,289 - v)(v + 633,75)}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &= 66,698 \int \left(\frac{1}{593,289 - v} + \frac{1}{v + 633,75} \right) dv \\
 &= 66,698 (-\ln|593,289 - v| + \ln|v + 633,75|) + C \\
 &= 66,698 \ln \left| \frac{633,75 + v}{593,289 - v} \right| + C \\
 t &= 66,698 \ln \left| \frac{633,75 + v}{593,289 - v} \right|_{0}^{28} \\
 &= 66,698 (0,158 - 0,066) \\
 &= 66,698 (0,092) \\
 t &= 6,136 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{6,136} = 4,563 \text{ km/h/det}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 20%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 20))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 363776)/1000 \\
 &= 367,023 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{191,406 - 0,02549v - 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 40,4603v + 303819,048} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(531,339 - v)(v + 571,799)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 74,189 \int \left(\frac{1}{531,339 - v} + \frac{1}{v + 571,799} \right) dv \\
 &= 74,189 (-\ln|531,339 - v| + \ln|v + 571,799|) + C
 \end{aligned}$$



$$= 74,189 \ln \left| \frac{571,799 + v}{531,339 - v} \right| + C$$

$$t = 74,189 \ln \left| \frac{571,799 + v}{531,339 - v} \right|_0^{28}$$

$$= 74,189 (0,175 - 0,0734)$$

$$= 74,189 (0,1016)$$

$$t = 7,538 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28 - 0}{7,538} = 3,715 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 22,5%**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 22,5))/1000$$

$$= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 409248)/1000$$

$$= 412,495 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{145,934 - 0,02549v - 0,00063v^2}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 40,4603v + 231641,27}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(461,486 - v)(v + 501,946)}$$

$$= 84,948 \int \left(\frac{1}{461,486 - v} + \frac{1}{v + 501,946} \right) dv$$

$$= 84,948 (-\ln|461,486 - v| + \ln|v + 501,946|) + C$$

$$= 84,948 \ln \left| \frac{501,946 + v}{461,486 - v} \right| + C$$

$$t = 84,948 \ln \left| \frac{501,946 + v}{461,486 - v} \right|_0^{28}$$

$$= 84,948 (0,201-0,084)$$

$$= 84,948 (0,117)$$

$$t = 9,939 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28-0}{9,939} = 2,817 \text{ km/h/det}$$

- **Kemiringan 25%**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 25))/1000$$

$$= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 454720)/1000$$

$$= 457,967 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{100,462 - 0,02549v - 0,00063v^2}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 40,4603v + 159463,492}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(379,611 - v)(v + 420,071)}$$

$$= 102,342 \int \left(\frac{1}{379,611 - v} + \frac{1}{v + 420,071} \right) dv$$

$$= 102,342 (-\ln|379,611 - v| + \ln|v + 420,071|) + C$$

$$= 102,342 \ln \left| \frac{420,071 + v}{379,611 - v} \right| + C$$

$$t = 102,342 \ln \left| \frac{420,071 + v}{379,611 - v} \right|_0^{28}$$

$$= 102,342 (0,242 - 0,101)$$

$$= 102,342 (0,141)$$

$$t = 14,43 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{28-0}{14,43} = 1,94 \text{ km/h/det}$$

2. Analisis Data Pengaruh Kemiringan Jalur Rel Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000 Pada Sub Periode Percepatan

- **Kemiringan 2,5%**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\ &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 2,5))/1000 \\ &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 45472)/1000 \\ &= 48,7192 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\ &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\ &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\ &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\ &= 574,463 - 5,788v \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{525,744 - 5,813v - 0,00063v^2} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 9226,984v + 834514,286} \\ &= 51,56 \int \frac{-1587,3 dv}{v^2 + 9226,984v - 834514,286} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(89,573 - v)(v + 9316,557)} \\ &= 8,701 \int \left(\frac{1}{89,573 - v} + \frac{1}{v + 9316,557} \right) dv \\ &= 8,701(-\ln|89,573 - v| + \ln|v + 9316,557|) + C \end{aligned}$$

$$= 8,701 \ln \left| \frac{9316,557 + v}{89,573 - v} \right| + C$$

❖ Kecepatan Maksimum 89,573 km/h

$$t = 8,701 \ln \left| \frac{9316,557 + v}{89,573 - v} \right|_{28}^{89,333}$$

$$= 8,701 (10,576 - 5,022)$$

$$= 8,701 (5,554)$$

$$= 48,325 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{89,333 - 28}{48,325} = 1,269 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 5 %**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m} G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \times 185,6 \times 5))/1000$$

$$= (3247,2 + 25,49v + 0,63069 \text{ v}^2 + 90944)/1000$$

$$= 94,191 + 0,02549v + 0,00063 \text{ v}^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right)$$

$$= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right)$$

$$= 253,831(2263,173 - 22,803v)$$

$$= 574463,466 - 5788,108v \text{ N}$$

$$= 574,463 - 5,788v \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{480,272 - 5,813v - 0,00063 \text{ v}^2}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 9226,984v + 762336,508}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(78,058 - v)(v + 9305,042)}$$

$$\begin{aligned}
 &= 8,722 \int \left(\frac{1}{78,058 - v} + \frac{1}{v + 9305,042} \right) dv \\
 &= 8,722 (-\ln|78,058 - v| + \ln|v + 9305,042|) + C \\
 &= 8,722 \ln \left| \frac{9305,042 + v}{78,058 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 78,058 km/h

$$\begin{aligned}
 t &= 8,722 \ln \left| \frac{9305,042 + v}{78,058 - v} \right|_{28}^{77,817} \\
 &= 8,722 (10,57 - 5,228) \\
 &= 8,722 (5,342) \\
 &= 46,593 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{77,817 - 28}{46,593} = 1,069 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 7,5 %**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 7,5))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 136416)/1000 \\
 &= 139,663 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\
 &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\
 &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\
 &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\
 &= 574,463 - 5,788v \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{434,8 - 5,813v - 0,00063v^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{-v^2 - 9226,984v + 690158,73} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(74,201 - v)(v + 9301,185)} \\
 &= 8,729 \int \left(\frac{1}{74,201 - v} + \frac{1}{v + 9301,185} \right) dv \\
 &= 8,729 (-\ln|74,201 - v| + \ln|v + 9301,185|) + C \\
 &= 8,729 \ln \left| \frac{9301,185 + v}{74,201 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 74,201 km/h

$$\begin{aligned}
 t &= 8,729 \ln \left| \frac{9301,185 + v}{74,201 - v} \right|_{28}^{73,961} \\
 &= 8,729 (10,573 - 5,308) \\
 &= 8,729 (5,265) \\
 &= 45,958 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{73,961 - 28}{45,958} = 1 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 10%**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 10))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 181888)/1000 \\
 &= 185,135 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\
 &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\
 &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\
 &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\
 &= 574,463 - 5,788v \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
&= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{389,328 - 5,813v - 0,00063v^2} \\
&= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{-v^2 - 9226,984v + 617980,952} \\
&= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(66,496 - v)(v + 9293,48)} \\
&= 8,744 \int \left(\frac{1}{66,496 - v} + \frac{1}{v + 9293,48} \right) dv \\
&= 8,744 (-\ln|66,496 - v| + \ln|v + 9293,48|) + C \\
&= 8,744 \ln \left| \frac{9293,48 + v}{66,496 - v} \right| + C
\end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 66,496 km/h

$$\begin{aligned}
t &= 8,744 \ln \left| \frac{9293,48 + v}{66,496 - v} \right|_{28}^{66,256} \\
&= 8,744 (10,571 - 5,49) \\
&= 8,744 (5,081) \\
t &= 44,428 \text{ detik} \\
a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{66,256 - 28}{44,428} = 0,861 \text{ km/h/det}
\end{aligned}$$

• **Kemiringan 12,5%**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000$$

$$= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 12,5))/1000$$

$$= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 227360)/1000$$

$$= 230,607 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_i = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right)$$

$$= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right)$$

$$\begin{aligned}
 &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\
 &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\
 &= 574,463 - 5,788v \text{ kN} \\
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{343,856 - 5,813v - 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{-v^2 - 9226,984v + 545803,175} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(58,778 - v)(v + 9285,762)} \\
 &= 8,758 \int \left(\frac{1}{58,778 - v} + \frac{1}{v + 9285,762} \right) dv \\
 &= 8,758 (-\ln|58,778 - v| + \ln|v + 9285,762|) + C \\
 &= 8,758 \ln \left| \frac{9285,762 + v}{58,778 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 58,778 km/h

$$\begin{aligned}
 t &= 8,758 \ln \left| \frac{9285,762 + v}{58,778 - v} \right|_{28}^{58,538} \\
 &= 8,758 (10,57 - 5,712) \\
 &= 8,758 (4,858) \\
 t &= 42,546 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{58,538 - 28}{42,546} = 0,718 \text{ km/h/det}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 15%**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m} G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 15))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 272832)/1000 \\
 &= 276,079 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\
 &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\
 &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\
 &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\
 &= 574,463 - 5,788v \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{298,384 - 5,813v - 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{-v^2 - 9226,984v + 473625,397} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(51,048 - v)(v + 9278,032)} \\
 &= 8,773 \int \left(\frac{1}{51,048 - v} + \frac{1}{v + 9278,032} \right) dv \\
 &= 8,773 (-\ln|51,048 - v| + \ln|v + 9278,032|) + C \\
 &= 8,773 \ln \left| \frac{9278,032 + v}{51,048 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 51,048 km/h

$$\begin{aligned}
 t &= 8,733 \ln \left| \frac{9278,032 + v}{51,048 - v} \right|_{28}^{50,808} \\
 &= 8,733 (10,568 - 6,001) \\
 &= 8,733 (4,567) \\
 t &= 39,884 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{50,808 - 28}{39,884} = 0,572 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 17,5%**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 17,5)) / 1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 318304) / 1000 \\
 &= 321,551 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\
 &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\
 &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\
 &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\
 &= 574,463 - 5,788v \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{252,912 - 5,813v - 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 9226,984v + 401447,619} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(43,305 - v)(v + 9270,289)} \\
 &= 8,787 \int \left(\frac{1}{43,305 - v} + \frac{1}{v + 9270,289} \right) dv \\
 &= 8,787 (-\ln|43,305 - v| + \ln|v + 9270,289|) + C \\
 &= 8,787 \ln \left| \frac{9270,289 + v}{43,305 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 43,305 km/h

$$t = 8,787 \ln \left| \frac{9270,289 + v}{43,305 - v} \right|_{28}^{43,065}$$

$$= 8,787 (10,566 - 6,409)$$

$$= 8,787 (4,157)$$

$$t = 36,528 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{43,065 - 28}{36,528} = 0,412 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 20%**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\ &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 20))/1000 \\ &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 363776)/1000 \\ &= 367,023 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\ &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\ &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\ &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\ &= 574,463 - 5,788v \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{207,44 - 5,813v - 0,00063v^2} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 9226,984v + 329269,841} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(35,549 - v)(v + 9262,533)} \\ &= 8,802 \int \left(\frac{1}{35,549 - v} + \frac{1}{v + 9262,533} \right) dv \\ &= 8,802 (-\ln|35,549 - v| + \ln|v + 9262,533|) + C \\ &= 8,802 \ln \left| \frac{9262,533 + v}{35,549 - v} \right| + C \end{aligned}$$

❖ **Kecepatan Maksimum 35,549 km/h**

$$\begin{aligned} t &= 8,802 \ln \left| \frac{9262,533 + v}{35,549 - v} \right|_{28}^{35,309} \\ &= 8,802 (10,565 - 7,115) \\ &= 8,802 (3,45) \\ t &= 30,367 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{35,309 - 28}{30,367} = 0,241 \text{ km/h/det}$$

- **Kemiringan 22,5%**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\ &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) + (98 \times 185,6 \times 22,5))/1000 \\ &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 409248)/1000 \\ &= 412,495 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\ &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\ &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\ &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\ &= 574,463 - 5,788v \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{161,968 - 5,813v - 0,00063v^2} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 9226,984v + 257092,064} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(27,779 - v)(v + 9254,763)} \\ &= 8,817 \int \left(\frac{1}{27,779 - v} + \frac{1}{v + 9254,763} \right) dv \\ &= 8,817 (-\ln|27,779 - v| + \ln|v + 9254,763|) + C \\ &= 8,817 \ln \left| \frac{9254,763 + v}{27,779 - v} \right| + C \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 27,779 km/h

- **Kemiringan 25%**

$$T = 2263,173 - 22,803v$$

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\ &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) + (98 \times 185,6 \times 25))/1000 \\ &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 + 454720)/1000 \\ &= 457,967 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) \\ &= 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{(2263,173 - 22,803v) \times 9,8}{0,86} \right) \\ &= 253,831(2263,173 - 22,803v) \\ &= 574463,466 - 5788,108v \text{ N} \\ &= 574,463 - 5,788v \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{116,496 - 5,813v - 0,00063v^2} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 9226,984v + 184914,286} \\ &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(19,997 - v)(v + 9246,981)} \\ &= 8,831 \int \left(\frac{1}{19,997 - v} + \frac{1}{v + 9246,981} \right) dv \\ &= 8,831 (-\ln|19,997 - v| + \ln|v + 9246,981|) + C \\ &= 8,831 \ln \left| \frac{9246,981 + v}{19,997 - v} \right| + C \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 19,997 km/h

3. Analisis Data Pengaruh Kemiringan Terhadap Kinerja KRL Rheostatik T6000

Pada Sub Periode Perlambatan

Kemiringan 2,5%

$$\begin{aligned}F_{rg} &= F_r - F_g \\&= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000 \\&= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) - (98 \times 185,6 \times 2,5))/1000 \\&= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 45472)/1000 \\&= -42,225 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\&= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-600,654 + 0,02549v + 0,00063v^2} \\&= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 40,4603v - 953419,048} \\&= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 956,411)(v + 996,871)} \\&= 51,56 \int \frac{-1587,3 dv}{(956,411 - v)(v + 996,871)} \\&= -41,899 \int \left(\frac{1}{956,411 - v} + \frac{1}{v + 996,871} \right) dv \\&= -41,899 (-\ln|956,411 - v| + \ln|v + 996,871|) + C \\&= -41,899 \ln \left| \frac{996,871 + v}{956,411 - v} \right| + C \\t &= -41,899 \ln \left| \frac{996,871 + v}{956,411 - v} \right|_{89,573} \\&= -41,899 (0,066 - 0,226) \\&= -41,899 (-0,16)\end{aligned}$$

$$t = 6,704 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{89,573 - 12}{6,704} = 11,571 \text{ km/h/det}$$

• Kemiringan 5 %

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$\begin{aligned}
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) - (98 \times 185,6 \times 5))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 90944)/1000 \\
 &= -87,697 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-646,126 + 0,02549v + 0,00063v^2}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 40,4603v - 1025596,825}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 992,689)(v + 1033,15)}$$

$$= 51,56 \int \frac{-1587,3 dv}{(992,689 - v)(v + 1033,15)}$$

$$= -40,399 \int \left(\frac{1}{992,689 - v} + \frac{1}{v + 1033,15} \right) dv$$

$$= -40,399 (-\ln|992,689 - v| + \ln|v + 1033,15|) + C$$

$$= -40,399 \ln \left| \frac{1033,15 + v}{992,689 - v} \right| + C$$

$$t = -40,399 \ln \left| \frac{1033,15 + v}{992,689 - v} \right|_{78,058}^{12}$$

$$= -40,399 (0,0637 - 0,1947)$$

$$= -40,399 (-0,131)$$

$$t = 5,292 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{78,058 - 12}{5,292} = 12,483 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 7,5 %**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) - (98 \times 185,6 \times 7,5))/1000$$

$$\begin{aligned}
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 136416)/1000 \\
 &= -133,169 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN} \\
 F_t &= 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN} \\
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-691,598 + 0,02549v + 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{v^2 + 40,4603v - 1097774,603} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{(v - 1027,713)(v + 1068,173)} \\
 &= 51,56 \int \frac{-1587,3dv}{(1027,713 - v)(v + 1068,173)} \\
 &= -39,048 \int \left(\frac{1}{1027,713 - v} + \frac{1}{v + 1068,173} \right) dv \\
 &= -39,048 (-\ln|1027,713 - v| + \ln|v + 1068,173|) + C \\
 &= -39,048 \ln \left| \frac{1068,173 + v}{1027,713 - v} \right| + C \\
 t &= -39,048 \ln \left| \frac{1068,173 + v}{1027,713 - v} \right|_{74,201}^{12} \\
 &= -39,048 (0,0615 - 0,1807) \\
 &= -39,048 (-0,1192) \\
 t &= 4,655 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{74,201 - 12}{4,655} = 13,362 \text{ km/h/det}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 10%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) - (98 \text{ m G}))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) - (98 \times 185,6 \times 10))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 181888)/1000 \\
 &= -178,641 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$



$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-737,07 + 0,02549v + 0,00063v^2}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{v^2 + 40,4603v - 1169952,381}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{(v - 1061,602)(v + 1102,063)}$$

$$= 51,56 \int \frac{-1587,3dv}{(1061,602 - v)(v + 1102,063)}$$

$$= -37,825 \int \left(\frac{1}{1061,602 - v} + \frac{1}{v + 1102,063} \right) dv$$

$$= -37,825 (-\ln|1061,602 - v| + \ln|v + 1102,063|) + C$$

$$= -37,825 \ln \left| \frac{1102,063 + v}{1061,602 - v} \right| + C$$

$$t = -37,825 \ln \left| \frac{1102,063 + v}{1061,602 - v} \right|_{66,496}^{12}$$

$$= -37,825 (0,0596 - 0,1607)$$

$$= -37,825 (-0,1011)$$

$$t = 3,824 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{66,496 - 12}{3,824} = 14,251 \text{ km/h/detik}$$

- **Kemiringan 12,5%**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) - (98 \text{ m} G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) - (98 \times 185,6 \times 12,5))/1000$$

$$= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 227360)/1000$$

$$= -224,113 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
&= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-782,542 + 0,02549v + 0,00063v^2} \\
&= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{v^2 + 40,4603v - 1242130,159} \\
&= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{(v - 1094,462)(v + 1134,923)} \\
&= 51,56 \int \frac{-1587,3dv}{(1094,462 - v)(v + 1134,923)} \\
&= -36,71 \int \left(\frac{1}{1094,462 - v} + \frac{1}{v + 1134,923} \right) dv \\
&= -36,71 (-\ln|1094,462 - v| + \ln|v + 1134,923|) + C \\
&= -36,71 \ln \left| \frac{1134,923 + v}{1094,462 - v} \right| + C \\
t &= -36,71 \ln \left| \frac{1134,923 + v}{1094,462 - v} \right|_{58,778}^{12} \\
&= -36,71 (0,0578 - 0,142) \\
&= -36,71 (-0,0842) \\
t &= 3,091 \text{ detik} \\
a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{58,778 - 12}{3,091} = 15,134 \text{ km/h/det}
\end{aligned}$$

- **Kemiringan 15%**

$$\begin{aligned}
F_{rg} &= F_r + F_g \\
&= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) - (98 \text{ m} G))/1000 \\
&= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069v^2) - (98 \times 185,6 \times 15))/1000 \\
&= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 272832)/1000 \\
&= -269,585 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
\end{aligned}$$

$$F_i = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-828,014 + 0,02549v + 0,00063v^2}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{v^2 + 40,4603v - 1314307,937}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{(v-1126,381)(v+1166,841)}$$

$$= 51,56 \int \frac{-1587,3dv}{(1126,381-v)(v+1166,841)}$$

$$= -35,688 \int \left(\frac{1}{1126,381-v} + \frac{1}{v+1166,841} \right) dv$$

$$= -35,688 (-\ln|1126,381-v| + \ln|v+1166,841|) + C$$

$$= -35,688 \ln \left| \frac{1166,841+v}{1126,381-v} \right| + C$$

$$t = -35,688 \ln \left| \frac{1166,841+v}{1126,381-v} \right|_{51,048}$$

$$= -35,688 (0,0562 - 0,1245)$$

$$= -35,688 (-0,0683)$$

$$t = 2,437 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{51,048 - 12}{2,437} = 16,023 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 17,5%**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) - (98 \times 185,6 \times 17,5))/1000$$

$$= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 318304)/1000$$

$$= -315,057 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-873,486 + 0,02549v + 0,00063v^2}$$



$$\begin{aligned}
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{v^2 + 40,4603v - 1386485,714} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(v-1157,435)(v+1197,895)} \\
 &= 51,56 \int \frac{-1587,3 dv}{(1157,435 - v)(v+1197,895)} \\
 &= -34,747 \int \left(\frac{1}{1157,435 - v} + \frac{1}{v+1197,895} \right) dv \\
 &= -34,747(-\ln|1157,435 - v| + \ln|v+1197,895|) + C
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -34,747 \ln \left| \frac{1197,895 + v}{1157,435 - v} \right| + C \\
 t &= -34,747 \ln \left| \frac{1197,895 + v}{1157,435 - v} \right|_{43,305}^{12} \\
 &= -34,747 (0,0547 - 0,108) \\
 &= -34,747 (-0,0533)
 \end{aligned}$$

$$t = 1,852 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{43,305 - 12}{1,852} = 16,903 \text{ km/h/detik}$$

• **Kemiringan 20%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) - (98 \times 185,6 \times 20))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 363776)/1000 \\
 &= -360,529 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-918,958 + 0,02549v + 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3dv}{v^2 + 40,4603v - 1458663,492}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(v-1187,691)(v+1228,151)} \\
 &= 51,56 \int \frac{-1587,3 dv}{(1187,691-v)(v+1228,151)} \\
 &= -33,877 \int \left(\frac{1}{1187,691-v} + \frac{1}{v+1228,151} \right) dv \\
 &= -33,877 (-\ln|1187,691-v| + \ln|v+1228,151|) + C \\
 &= -33,877 \ln \left| \frac{1228,151+v}{1187,691-v} \right| + C
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= -33,877 \ln \left| \frac{1228,151+v}{1187,691-v} \right|_{35,549}^{12} \\
 &= -33,877 (0,0534-0,0924) \\
 &= -33,877 (-0,039)
 \end{aligned}$$

$$t = 1,321 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{35,549 - 12}{1,321} = 17,827 \text{ km/h/detik}$$

- **Kemiringan 22,5%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) - (98 \times 185,6 \times 22,5))/1000 \\
 &= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 409248)/1000 \\
 &= -406,001 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-964,43 + 0,02549v + 0,00063v^2} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 40,4603v - 1530841,27} \\
 &= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(v-1217,207)(v+1257,667)}
 \end{aligned}$$

$$= 51,56 \int \frac{-1587,3 dv}{(1217,207 - v)(v + 1257,667)}$$

$$= -33,069 \int \left(\frac{1}{1217,207 - v} + \frac{1}{v + 1257,667} \right) dv$$

$$= -33,069 (-\ln|1217,207 - v| + \ln|v + 1257,667|) + C$$

$$= -33,069 \ln \left| \frac{1257,667 + v}{1217,207 - v} \right| + C$$

$$t = -33,069 \ln \left| \frac{1257,667 + v}{1217,207 - v} \right|_{27,779}$$

$$= -33,069 (0,0521 - 0,0776)$$

$$= -33,069 (-0,0255)$$

$$t = 0,843 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{27,779 - 12}{0,843} = 18,718 \text{ km/h/detik}$$

• **Kemiringan 25%**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 185,6) + 2064 + (0,13734 \times 185,6)v + 0,63069 v^2) - (98 \times 185,6 \times 25))/1000$$

$$= (3247,2 + 25,49v + 0,63069v^2 - 454720)/1000$$

$$= -451,473 + 0,02549v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times \left(2\gamma \eta \frac{T}{D} \right) = 2 \times \left(2 \times \frac{99}{16} \times 0,9 \times \frac{2200 \times 9,8}{0,86} \right) = 558,429,07 \text{ N} = 558,429 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 185,6) \int \frac{dv}{-1009,902 + 0,02549v + 0,00063v^2}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 40,4603v - 1603019,048}$$

$$= 51,56 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 1246,035)(v + 1286,496)}$$

$$= 51,56 \int \frac{-1587,3 dv}{(1246,035 - v)(v + 1286,496)}$$

$$= -32,316 \int \left(\frac{1}{1246,035 - v} + \frac{1}{v + 1286,496} \right) dv$$

$$= -32,316 (-\ln|1246,035 - v| + \ln|v + 1286,496|) + C$$

$$= -32,316 \ln \left| \frac{1286,496 + v}{1246,035 - v} \right| + C$$

$$t = -32,316 \ln \left| \frac{1286,496 + v}{1246,035 - v} \right|_{19,997}^{12}$$

$$= -32,316 (0,0509 - 0,0636)$$

$$= -32,316 (-0,0127)$$

$$t = 0,41 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{19,997 - 12}{0,41} = 19,505 \text{ km/h/de}$$



LAMPIRAN 3

Analisis Data Perhitungan KRL VVVF Holec BN

1. Analisis Data Pengaruh Kemiringan Terhadap Kinerja KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Pengasutan

Kemiringan 2,5%

$$\begin{aligned}F_{rg} &= F_r + F_g \\&= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\&= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\&\quad (98 \times 226,65 \times 2,5))/1000 \\&= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 55529,25)/1000 \\&= 59,038 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\&= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{514,962 - 0,0311v - 0,00063v^2} \\&= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 817400} \\&= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(879,756 - v)(v + 929,121)} \\&= 55,251 \int \left(\frac{1}{879,756 - v} + \frac{1}{v + 929,121} \right) dv \\&= 55,251 (-\ln|879,756 - v| + \ln|v + 929,121|) + C \\&= 55,251 \ln \left| \frac{929,121 + v}{879,756 - v} \right| + C\end{aligned}$$

$$t = 55,251 \ln \left| \frac{929,121 + v}{879,756 - v} \right|_0^{30}$$

$$= 55,251 (0,121 - 0,055)$$

$$= 55,251 (0,066)$$

$$t = 3,647 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30-0}{3,647} = 8,226 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 5 %**

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\ &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\ &\quad (98 \times 226,65 \times 5))/1000 \\ &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 111058,5)/1000 \\ &= 114,567 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{459,433 - 0,0311v - 0,00063v^2} \\ &= 62,964 \int \frac{1587,3 \, dv}{-v^2 - 49,365v + 729258,73} \\ &= 62,964 \int \frac{1587,3 \, dv}{(829,641 - v)(v + 879,006)} \\ &= 58,492 \int \left(\frac{1}{829,641 - v} + \frac{1}{v + 879,006} \right) dv \\ &= 58,492 (-\ln|829,641 - v| + \ln|v + 879,006|) + C \\ &= 58,492 \ln \left| \frac{879,006 + v}{829,641 - v} \right| + C \end{aligned}$$

$$t = 58,492 \ln \left| \frac{879,006 + v}{829,641 - v} \right|_0^{30}$$

$$= 58,492 (0,128 - 0,058)$$

$$= 58,492 (0,07)$$

$$t = 4,094 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30-0}{4,094} = 7,328 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 7,5 %**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) + \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 7,5))/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 166587,75)/1000 \\
 &= 170,097 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{403,903 - 0,0311v - 0,00063v^2} \\
 &= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 641115,873} \\
 &= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(776,395 - v)(v + 825,76)} \\
 &= 62,38 \int \left(\frac{1}{776,395 - v} + \frac{1}{v + 825,76} \right) dv \\
 &= 62,38 (-\ln|776,395 - v| + \ln|v + 825,76|) + C \\
 &= 62,38 \ln \left| \frac{825,76 + v}{776,395 - v} \right| + C \\
 t &= 62,38 \ln \left| \frac{825,76 + v}{776,395 - v} \right|_0^{30} \\
 &= 62,38 (0,137 - 0,062) \\
 &= 62,38 (0,075) \\
 t &= 4,679 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 - 0}{4,679} = 6,412 \text{ km/h/det}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 10%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (98 \times 226,65 \times 10) / 1000 \\
 & = (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 222117) / 1000 \\
 & = 225,626 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \\
 F_t & = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t & = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 & = (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{348,374 - 0,0311v - 0,00063v^2} \\
 & = 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 552974,603} \\
 & = 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(719,35 - v)(v + 768,715)} \\
 & = 67,163 \int \left(\frac{1}{719,35 - v} + \frac{1}{v + 768,715} \right) dv \\
 & = 67,163 (-\ln|719,35 - v| + \ln|v + 768,715|) + C \\
 & = 67,163 \ln \left| \frac{768,715 + v}{719,35 - v} \right| + C \\
 t & = 67,163 \ln \left| \frac{768,715 + v}{719,35 - v} \right|_0^{30} \\
 & = 67,163 (0,147 - 0,066) \\
 & = 67,163 (0,081) \\
 t & = 5,44 \text{ detik} \\
 a & = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 - 0}{5,44} = 5,515 \text{ km/h/det}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 12,5%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} & = F_r + F_g \\
 & = ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m} G)) / 1000 \\
 & = (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\
 & \quad (98 \times 226,65 \times 12,5)) / 1000 \\
 & = (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 277646,25) / 1000 \\
 & = 281,155 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \\
 F_t & = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{292,845 - 0,0311v - 0,00063v^2} \\
 &= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 464833,333} \\
 &= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(657,551 - v)(v + 706,916)} \\
 &= 73,247 \int \left(\frac{1}{657,551 - v} + \frac{1}{v + 706,916} \right) dv \\
 &= 73,247 (-\ln|657,551 - v| + \ln|v + 706,916|) + C \\
 &= 73,247 \ln \left| \frac{706,916 + v}{657,551 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 73,247 \ln \left| \frac{706,916 + v}{657,551 - v} \right|_{0}^{30} \\
 &= 73,247 (0,161 - 0,072) \\
 &= 73,247 (0,089)
 \end{aligned}$$

$$t = 6,519 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 - 0}{6,519} = 4,602 \text{ km/h/detik}$$

- **Kemiringan 15%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m} G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 15))/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 333175,5)/1000 \\
 &= 336,684 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{237,316 - 0,0311v - 0,00063v^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 376692,064} \\
 &= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(589,566 - v)(v + 638,931)} \\
 &= 81,354 \int \left(\frac{1}{589,566 - v} + \frac{1}{v + 638,931} \right) dv \\
 &= 81,354 (-\ln|589,566 - v| + \ln|v + 638,931|) + C \\
 &= 81,354 \ln \left| \frac{638,931 + v}{589,566 - v} \right| + C \\
 t &= 81,354 \ln \left| \frac{638,931 + v}{589,566 - v} \right|_0^{30} \\
 &= 81,354 (0,179 - 0,08) \\
 &= 81,354 (0,099) \\
 t &= 8,054 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 - 0}{8,054} = 3,725 \text{ km/h/detik}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 17,5%**

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) + \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 17,5))/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 388704,75)/1000 \\
 &= 392,214 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{181,786 - 0,0311v - 0,00063v^2} \\
 &= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 288549,206} \\
 &= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(513,052 - v)(v + 562,417)}
 \end{aligned}$$



$$= 92,929 \int \left(\frac{1}{513,052 - v} + \frac{1}{v + 562,417} \right) dv$$

$$= 92,929 (-\ln|513,052 - v| + \ln|v + 562,417|) + C$$

$$= 92,929 \ln \left| \frac{562,417 + v}{513,052 - v} \right| + C$$

$$t = 92,929 \ln \left| \frac{562,417 + v}{513,052 - v} \right|_{0}^{30}$$

$$= 92,929 (0,204 - 0,092)$$

$$= 92,929 (0,112)$$

$$t = 10,408 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 - 0}{10,408} = 2,882 \text{ km/h/det}$$

- **Kemiringan 20%**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) +$$

$$(98 \times 226,65 \times 20))/1000$$

$$= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 444234)/1000$$

$$= 447,743 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{126,257 - 0,0311v - 0,00063v^2}$$

$$= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 200407,937}$$

$$= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(423,667 - v)(v + 473,032)}$$

$$= 111,456 \int \left(\frac{1}{423,667 - v} + \frac{1}{v + 473,032} \right) dv$$

$$= 111,456 (-\ln|423,667 - v| + \ln|v + 473,032|) + C$$

$$= 111,456 \ln \left| \frac{473,032 + v}{423,667 - v} \right| + C$$

$$t = 111,456 \ln \left| \frac{473,032 + v}{423,667 - v} \right|_0^{30}$$

$$= 111,456 (0,245 - 0,11)$$

$$= 111,456 (0,135)$$

$$t = 15,047 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 - 0}{15,047} = 1,994 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 22,5%**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m} G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + (98 \times 226,65 \times 22,5))/1000$$

$$= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 499763,25)/1000$$

$$= 503,272 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{70,728 - 0,0311v - 0,00063v^2}$$

$$= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 112266,667}$$

$$= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(311,288 - v)(v + 360,653)}$$

$$= 148,737 \int \left(\frac{1}{311,288 - v} + \frac{1}{v + 360,653} \right) dv$$

$$= 148,737 (-\ln|311,288 - v| + \ln|v + 360,653|) + C$$

$$= 148,737 \ln \left| \frac{360,653 + v}{311,288 - v} \right| + C$$

$$t = 148,737 \ln \left| \frac{360,653 + v}{311,288 - v} \right|_0^{30}$$

$$= 148,737 (0,328-0,147)$$

$$= 148,737 (0,181)$$

$$t = 26,921 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30-0}{26,921} = 1,114 \text{ km/h/det}$$

- **Kemiringan 25%**

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + (98 \times 226,65 \times 25))/1000$$

$$= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 555292,5)/1000$$

$$= 558,801 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_t = 2 \times 287 \text{ kN} = 574 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{15,199 - 0,0311v - 0,00063v^2}$$

$$= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{-v^2 - 49,365v + 24125,397}$$

$$= 62,964 \int \frac{1587,3 dv}{(132,59 - v)(v + 181,955)}$$

$$= 317,738 \int \left(\frac{1}{132,59 - v} + \frac{1}{v + 181,955} \right) dv$$

$$= 317,738 (-\ln|132,59 - v| + \ln|v + 181,955|) + C$$

$$= 317,738 \ln \left| \frac{181,955 + v}{132,59 - v} \right| + C$$

$$t = 317,738 \ln \left| \frac{181,955 + v}{132,59 - v} \right|_0^{30}$$

$$= 317,738 (0,726-0,316)$$

$$= 317,738 (0,41)$$

$$t = 130,273 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 - 0}{130,273} = 0,23 \text{ km/h/det}$$

2. Analisis Data Pengaruh Kemiringan Jalur Rel Terhadap Kinerja KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Percepatan

- **Kemiringan 2,5%**

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\ &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\ &\quad (98 \times 226,65 \times 2,5))/1000 \\ &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 55529,25)/1000 \\ &= 59,038 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{626,482 - 6,007v - 0,00063v^2} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9535,079v + 994415,873} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{(103,174 - v)(9638,253 + v)} \\ &= 10,259 \int \left(\frac{1}{103,174 - v} + \frac{1}{9638,253 + v} \right) dv \\ &= 10,259 (-\ln|103,174 - v| + \ln|9638,253 + v|) + C \\ &= 10,259 \ln \left| \frac{9638,253 + v}{103,174 - v} \right| + C \end{aligned}$$

- ❖ Kecepatan Maksimum 103,174 km/h

$$\begin{aligned} t &= 10,259 \ln \left| \frac{9638,253 + v}{103,174 - v} \right|_{30}^{103,173} \\ &= 10,259 (16,092 - 4,884) \\ &= 10,259 (11,208) \\ &= 114,983 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{103,173 - 30}{114,983} = 0,636 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 5 %**

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\ &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\ &\quad (98 \times 226,65 \times 5))/1000 \\ &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 111058,5)/1000 \\ &= 114,567 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{570,953 - 6,007v - 0,00063v^2} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,302 \, dv}{-v^2 - 9535,079v + 906274,603} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,302 \, dv}{(94,117 - v)(9629,196 + v)} \\ &= 10,279 \int \left(\frac{1}{94,117 - v} + \frac{1}{9629,196 + v} \right) dv \\ &= 10,279 (-\ln|94,117 - v| + \ln|9629,196 + v|) + C \\ &= 10,279 \ln \left| \frac{9629,196 + v}{94,117 - v} \right| + C \end{aligned}$$

❖ **Kecepatan Maksimum 94,117 km/h**

$$\begin{aligned} t &= 10,279 \ln \left| \frac{9629,196 + v}{94,117 - v} \right|_{30}^{94,116} \\ &= 10,279 (16,09 - 5,015) \\ &= 10,279 (11,075) \\ &= 113,84 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{94,116 - 30}{113,84} = 0,563 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 7,5 %**

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\ &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\ &\quad (98 \times 226,65 \times 7,5))/1000 \\ &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 166587,75)/1000 \\ &= 170,097 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{515,423 - 6,007v - 0,00063v^2} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9535,079v + 818131,746} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{(85,044 - v)(9620,123 + v)} \\ &= 10,298 \int \left(\frac{1}{85,044 - v} + \frac{1}{9620,123 + v} \right) dv \\ &= 10,298 (-\ln|85,044 - v| + \ln|9620,123 + v|) + C \\ &= 10,298 \ln \left| \frac{9620,123 + v}{85,044 - v} \right| + C \end{aligned}$$

❖ **Kecepatan Maksimum 85,044 km/h**

$$\begin{aligned} t &= 10,298 \ln \left| \frac{9620,123 + v}{85,044 - v} \right|_{30}^{85,043} \\ &= 10,298 (16,088 - 5,167) \\ &= 10,298 (10,921) \\ &= 112,464 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{85,043 - 30}{112,464} = 0,489 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 10%**

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 10))/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 222117)/1000 \\
 &= 225,626 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{459,894 - 6,007v - 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 \, dv}{-v^2 - 9535,079v + 729990,476} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 \, dv}{(75,953 - v)(9611,032 + v)} \\
 &= 10,317 \int \left(\frac{1}{75,953 - v} + \frac{1}{9611,032 + v} \right) dv \\
 &= 10,317 (-\ln|75,953 - v| + \ln|9611,032 + v|) + C \\
 &= 10,317 \ln \left| \frac{9611,032 + v}{75,953 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 75,953 km/h

$$\begin{aligned}
 t &= 10,317 \ln \left| \frac{9611,032 + v}{75,953 - v} \right|_{30}^{75,952} \\
 &= 10,317 (16,086 - 5,346) \\
 &= 10,317 (10,74) \\
 &= 110,805 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{75,952 - 30}{110,805} = 0,415 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 12,5%**

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (98 \times 226,65 \times 12,5) / 1000 \\ & = (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 277646,25) / 1000 \\ & = 281,155 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{404,365 - 6,007v - 0,00063v^2} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9535,079v + 641849,206} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{(66,846 - v)(9601,925 + v)} \\ &= 10,337 \int \left(\frac{1}{66,846 - v} + \frac{1}{9601,925 + v} \right) dv \\ &= 10,337 (-\ln|66,846 - v| + \ln|9601,925 + v|) + C \\ &= 10,337 \ln \left| \frac{9601,925 + v}{66,846 - v} \right| + C \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 66,846 km/h

$$\begin{aligned} t &= 10,337 \ln \left| \frac{9601,925 + v}{66,846 - v} \right|_{30}^{66,845} \\ &= 10,337 (16,084 - 5,566) \\ &= 10,337 (10,518) \\ &= 108,725 \text{ detik} \\ a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{66,845 - 30}{108,725} = 0,339 \text{ km/h/det} \end{aligned}$$

• **Kemiringan 15%**

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{rg} &= F_r + F_g \\ &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ m}v + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m} G)) / 1000 \\ &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\ & \quad (98 \times 226,65 \times 15)) / 1000 \\ &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 332955) / 1000 \\ &= 336,464 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
&= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{349,056 - 6,007v - 0,00063v^2} \\
&= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9535,079v + 554057,143} \\
&= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{(57,757 - v)(9592,836 + v)} \\
&= 10,356 \int \left(\frac{1}{57,757 - v} + \frac{1}{9592,836 + v} \right) dv \\
&= 10,356 (-\ln|57,757 - v| + \ln|9592,836 + v|) + C \\
&= 10,356 \ln \left| \frac{9592,836 + v}{57,757 - v} \right| + C
\end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 57,757 km/h

$$\begin{aligned}
t &= 10,356 \ln \left| \frac{9592,836 + v}{57,757 - v} \right|_{30}^{57,756} \\
&= 10,356 (16,083 - 5,848) \\
&= 10,356 (10,235) \\
&= 105,994 \text{ detik} \\
a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{57,756 - 30}{105,994} = 0,262 \text{ km/h/detik}
\end{aligned}$$

• Kemiringan 17,5%

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$F_{rg} = F_r + F_g$$

$$= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) + (98 \text{ m G}))/1000$$

$$= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) +$$

$$(98 \times 226,65 \times 17,5))/1000$$

$$= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 388704,75)/1000$$

$$= 392,214 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$\begin{aligned}
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{293,306 - 6,007v - 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9535,079v + 465565,079} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{(48,579 - v)(9583,658 + v)} \\
 &= 10,376 \int \left(\frac{1}{48,579 - v} + \frac{1}{9583,658 + v} \right) dv \\
 &= 10,376 (-\ln|48,579 - v| + \ln|9583,658 + v|) + C \\
 &= 10,376 \ln \left| \frac{9583,658 + v}{48,579 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 48,579 km/h

$$\begin{aligned}
 t &= 10,376 \ln \left| \frac{9583,658 + v}{48,579 - v} \right|_{30}^{48,578} \\
 &= 10,376 (16,081 - 6,249) \\
 &= 10,376 (9,832) \\
 &= 102,017 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{48,578 - 30}{102,017} = 0,182 \text{ km/h/detik}$$

• Kemiringan 20%

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) + \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 20))/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 444234)/1000 \\
 &= 447,743 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{237,777 - 6,007v - 0,00063v^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9535,079v + 377423,81} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{(39,42 - v)(9574,499 + v)} \\
 &= 10,395 \int \left(\frac{1}{39,42 - v} + \frac{1}{9574,499 + v} \right) dv \\
 &= 10,395 (-\ln|39,42 - v| + \ln|9574,499 + v|) + C \\
 &= 10,395 \ln \left| \frac{9574,499 + v}{39,42 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 39,42 km/h

$$\begin{aligned}
 t &= 10,395 \ln \left| \frac{9574,499 + v}{39,42 - v} \right|_{30}^{39,419} \\
 &= 10,395 (16,079 - 6,927) \\
 &= 10,395 (9,152) \\
 &= 95,135 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{39,419 - 30}{95,135} = 0,099 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 22,5%**

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) + (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 22,5))/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 499763,25)/1000 \\
 &= 503,272 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{182,248 - 6,007v - 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 dv}{-v^2 - 9535,079v + 289282,54}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 \, dv}{(30,243 - v)(9565,322 + v)} \\
 &= 10,415 \int \left(\frac{1}{30,243 - v} + \frac{1}{9565,322 + v} \right) dv \\
 &= 10,415 (-\ln|30,243 - v| + \ln|9565,322 + v|) + C \\
 &= 10,415 \ln \left| \frac{9565,322 + v}{30,243 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 30,243 km/h

• **Kemiringan 25%**

$$F_t = 2 \times (342,76 - 2,988v) = 685,52 - 5,976v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rg} &= F_r + F_g \\
 &= ((6,3765 \, m + 2064 + 0,13734 \, mv + 0,63069 \, v^2) + (98 \, m \, G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) + \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 25))/1000 \\
 &= (3508,894 + 31,128v + 0,63069v^2 + 555292,5)/1000 \\
 &= 558,801 + 0,0311v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \, m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{126,719 - 6,007v - 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 \, dv}{-v^2 - 9535,079v + 201141,27} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,302 \, dv}{(21,048 - v)(9556,127 + v)} \\
 &= 10,435 \int \left(\frac{1}{21,048 - v} + \frac{1}{9556,127 + v} \right) dv \\
 &= 10,435 (-\ln|21,048 - v| + \ln|9556,127 + v|) + C \\
 &= 10,435 \ln \left| \frac{9556,127 + v}{21,048 - v} \right| + C
 \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Maksimum 21,048 km/h



3. Analisis Data Pengaruh Kemiringan Terhadap Kinerja KRL VVVF Holec BN Pada Sub Periode Perlambatan

Kemiringan 2,5%

Kondisi 1

$$F_t = 2 \times (424,96 - 2,686v) = 849,92 - 5,372v \text{ kN}$$

$$F_{rgc} = F_r - F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G)) / 1000$$

$$= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) -$$

$$(98 \times 226,65 \times 2,5)) / 1000$$

$$= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 55529,25) / 1000$$

$$= -52,02 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$t_l = 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-901,94 + 5,397v + 0,00063v^2}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 8566,667v - 1431650,794}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 163,98)(v + 8730,647)}$$

$$= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(163,98 - v)(v + 8730,647)}$$

$$= -11,236 \int \left(\frac{1}{163,98 - v} + \frac{1}{v + 8730,647} \right) dv$$

$$= -11,236 (-\ln|163,98 - v| + \ln|v + 8730,647|) + C$$

$$= -11,236 \ln \left| \frac{8730,647 + v}{163,98 - v} \right| + C$$

$$t_l = -11,236 \ln \left| \frac{8730,647 + v}{163,98 - v} \right|_{103,174}^{60}$$

$$= -11,236 (4,437 - 4,979)$$

$$= -11,236 (-0,542)$$

$$t_l = 6,09 \text{ detik}$$

Kondisi 2

$$F_t = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} t_2 &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\ &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-594,52 + 0,025v + 0,00063v^2} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 39,683v - 943682,54} \\ &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 951,794)(v + 991,477)} \\ &= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(951,794 - v)(v + 991,477)} \\ &= -51,429 \int \left(\frac{1}{951,794 - v} + \frac{1}{v + 991,477} \right) dv \\ &= -51,429 (-\ln|951,794 - v| + \ln|v + 991,477|) + C \\ &= -51,429 \ln \left| \frac{991,477 + v}{951,794 - v} \right| + C \\ t_2 &= -51,429 \ln \left| \frac{991,477 + v}{951,794 - v} \right|_{60}^0 \\ &= -51,429 (0,041 - 0,165) \\ &= -51,429 (-0,124) \\ t_2 &= 6,377 \text{ detik} \\ t &= t_1 + t_2 = 6,09 + 6,377 = 12,467 \text{ detik} \\ a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{103,174 - 0}{12,467} = 8,276 \text{ km/h/detik} \end{aligned}$$

- **Kemiringan 5 %**

Kondisi 1

$$F_t = 2 \times (424,96 - 2,686v) = 849,92 - 5,372v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{rgc} &= F_r - F_g \\ &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) - (98 \text{ m G}))/1000 \\ &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) - \\ &\quad (98 \times 226,65 \times 5))/1000 \end{aligned}$$

$$= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 111058,5)/1000$$

$$= -107,55 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$t_1 = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-957,47 + 5,397v + 0,00063v^2}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 8566,667v - 1519793,651}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 173,879)(v + 8740,546)}$$

$$= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(173,879 - v)(v + 8740,546)}$$

$$= -11,211 \int \left(\frac{1}{173,879 - v} + \frac{1}{v + 8740,546} \right) dv$$

$$= -11,211 (-\ln|173,879 - v| + \ln|v + 8740,546|) + C$$

$$= -11,211 \ln \left| \frac{8740,546 + v}{173,879 - v} \right| + C$$

$$t_1 = -11,211 \ln \left| \frac{8740,546 + v}{173,879 - v} \right|_{94,117}^{60}$$

$$= -11,211 (4,347 - 4,707)$$

$$= -11,211 (-0,36)$$

$$t_1 = 4,036 \text{ detik}$$

Kondisi 2

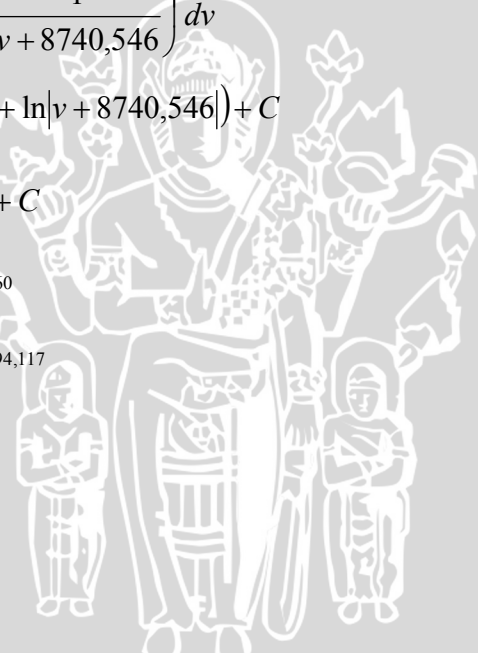
$$F_t = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$t_2 = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-650,05 + 0,025v + 0,00063v^2}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 39,683v - 1031825,397}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 996,14)(v + 1035,823)}$$



$$\begin{aligned}
 &= 62,963 \int \frac{-1587,3 \, dv}{(996,14 - v)(v + 1035,823)} \\
 &= -49,185 \int \left(\frac{1}{996,14 - v} + \frac{1}{v + 1035,823} \right) dv \\
 &= -49,185 (-\ln|996,14 - v| + \ln|v + 1035,823|) + C \\
 &= -49,185 \ln \left| \frac{1035,823 + v}{996,14 - v} \right| + C \\
 t_2 &= -49,185 \ln \left| \frac{1035,823 + v}{996,14 - v} \right|_{60}^0 \\
 &= -49,185 (0,039 - 0,157) \\
 &= -49,185 (-0,118)
 \end{aligned}$$

$$t_2 = 5,804 \text{ detik}$$

$$t = t_1 + t_2 = 4,036 + 5,804 = 9,84 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{94,117 - 0}{9,84} = 9,565 \text{ km/h/detik}$$

- **Kemiringan 7,5 %**

Kondisi 1

$$F_t = 2 \times (424,96 - 2,686v) = 849,92 - 5,372v \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r - F_g \\
 &= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) - (98 \text{ m G}))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) - \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 7,5))/1000 \\
 &= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 166587,75)/1000 \\
 &= -163,079 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-1012,999 + 5,397v + 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 \, dv}{v^2 + 8566,667v - 1607934,921} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 \, dv}{(v - 183,755)(v + 8750,422)}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &= 62,963 \int \frac{-1587,3 \, dv}{(183,755 - v)(v + 8750,422)} \\
 &= -11,186 \int \left(\frac{1}{183,755 - v} + \frac{1}{v + 8750,422} \right) dv \\
 &= -11,186 (-\ln|183,755 - v| + \ln|v + 8750,422|) + C \\
 &= -11,186 \ln \left| \frac{8750,422 + v}{183,755 - v} \right| + C \\
 t_1 &= -11,186 \ln \left| \frac{8750,422 + v}{183,755 - v} \right|_{85,044}^{60} \\
 &= -11,186 (4,265 - 4,494) \\
 &= -11,186 (-0,229) \\
 t_1 &= 2,562 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

Kondisi 2

$$F_t = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$t_2 = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-705,579 + 0,025v + 0,00063v^2}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 \, dv}{v^2 + 39,683v - 1119966,667}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 \, dv}{(v - 1038,629)(v + 1078,312)}$$

$$= 62,963 \int \frac{-1587,3 \, dv}{(1038,629 - v)(v + 1078,312)}$$

$$= -47,21 \int \left(\frac{1}{1038,629 - v} + \frac{1}{v + 1078,312} \right) dv$$

$$= -47,21 (-\ln|1038,629 - v| + \ln|v + 1078,312|) + C$$

$$= -47,21 \ln \left| \frac{1078,312 + v}{1038,629 - v} \right| + C$$

$$t_2 = -47,21 \ln \left| \frac{1078,312 + v}{1038,629 - v} \right|_{60}^0$$

$$= -47,21 (0,037 - 0,151)$$



$$= -47,21 \text{ (-0,114)}$$

$$t_2 = 5,382 \text{ detik}$$

$$t = t_1 + t_2 = 2,562 + 5,382 = 7,944 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{85,044 - 0}{7,944} = 10,705 \text{ km/h/det}$$

- **Kemiringan 10%**

Kondisi 1

$$F_t = 2 \times (424,96 - 2,686v) = 849,92 - 5,372v \text{ kN}$$

$$F_{rgc} = F_r - F_g$$

$$= ((6,3765 \text{ m} + 2064 + 0,13734 \text{ mv} + 0,63069 \text{ v}^2) - (98 \text{ m G}))/1000$$

$$= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) -$$

$$(98 \times 226,65 \times 10))/1000$$

$$= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 222117)/1000$$

$$= -218,608 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$t_1 = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-1068,528 + 5,397v + 0,00063v^2}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 8566,667v - 1696076,19}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 193,61)(v + 8760,277)}$$

$$= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(193,61 - v)(v + 8760,277)}$$

$$= -11,162 \int \left(\frac{1}{193,61 - v} + \frac{1}{v + 8760,277} \right) dv$$

$$= -11,162 (-\ln|193,61 - v| + \ln|v + 8760,277|) + C$$

$$= -11,162 \ln \left| \frac{8760,277 + v}{193,61 - v} \right| + C$$

$$t_1 = -11,162 \ln \left| \frac{8760,277 + v}{193,61 - v} \right|_{75,953}^{60}$$

$$= -11,162 (4,19 - 4,319)$$

$$= -11,162 (-0,129)$$

$$t_1 = 1,44 \text{ detik}$$

Kondisi 2

$$F_t = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$t_2 = 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-761,108 + 0,025v + 0,00063v^2}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 39,683v - 1208107,937}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 1079,477)(v + 1119,16)}$$

$$= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(1079,477 - v)(v + 1119,16)}$$

$$= -45,456 \int \left(\frac{1}{1079,477 - v} + \frac{1}{v + 1119,16} \right) dv$$

$$= -47,456 (-\ln|1079,477 - v| + \ln|v + 1119,16|) + C$$

$$= -47,456 \ln \left| \frac{1119,16 + v}{1079,477 - v} \right| + C$$

$$t_2 = -47,456 \ln \left| \frac{1119,16 + v}{1079,477 - v} \right|_{60}^0$$

$$= -47,456 (0,036 - 0,146)$$

$$= -47,456 (-0,11)$$

$$t_2 = 5,22 \text{ detik}$$

$$t = t_1 + t_2 = 1,44 + 5,22 = 6,66 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{75,953 - 0}{6,66} = 11,404 \text{ km/h/det}$$

- **Kemiringan 12,5%**

Kondisi 1

$$F_t = 2 \times (424,96 - 2,686v) = 849,92 - 5,372v \text{ kN}$$

$$F_{rgc} = F_r - F_g$$



$$\begin{aligned}
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) - \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 12,5))/1000 \\
 &= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 277646,25)/1000 \\
 &= -274,137 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-1124,057 + 5,397v + 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 8566,667v - 1784217,46} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 203,443)(v + 8770,11)} \\
 &= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(203,443 - v)(v + 8770,11)} \\
 &= -11,137 \int \left(\frac{1}{203,443 - v} + \frac{1}{v + 8770,11} \right) dv \\
 &= -11,137 (-\ln|203,443 - v| + \ln|v + 8770,11|) + C \\
 &= -11,137 \ln \left| \frac{8770,11 + v}{203,443 - v} \right| + C \\
 t_1 &= -11,137 \ln \left| \frac{8770,11 + v}{203,443 - v} \right|_{66,846}^{60} \\
 &= -11,137 (4,12 - 4,17) \\
 &= -11,137 (-0,05) \\
 t_1 &= 0,557 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

Kondisi 2

$$F_t = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t_2 &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-816,637 + 0,025v + 0,00063v^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 39,683v - 1296249,206} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 1118,861)(v + 1158,544)} \\
 &= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(1118,861 - v)(v + 1158,544)} \\
 &= -43,884 \int \left(\frac{1}{1118,861 - v} + \frac{1}{v + 1158,544} \right) dv \\
 &= -43,884 (-\ln|1118,861 - v| + \ln|v + 1158,544|) + C \\
 &= -43,884 \ln \left| \frac{1158,544 + v}{1118,861 - v} \right| + C \\
 t_2 &= -43,884 \ln \left| \frac{1158,544 + v}{1118,861 - v} \right|_{60}^0 \\
 &= -43,884 (0,035 - 0,14) \\
 &= -43,884 (-0,105) \\
 t_2 &= 4,608 \text{ detik} \\
 t &= t_1 + t_2 = 0,557 + 4,608 = 5,165 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{66,846 - 0}{5,165} = 12,942 \text{ km/h/det}
 \end{aligned}$$

• **Kemiringan 15%**

Pada kemiringan jalan rel 15 permil dan di atasnya, kondisi 1 pada gambar 4.4 tidak berlaku, karena kecepatan puncak yang mampu dicapai oleh KRL dibawah 60 km/h, oleh karenanya hanya kondisi 2 yang berlaku.

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r - F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) - \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 15))/1000 \\
 &= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 333175,5)/1000 \\
 &= -329,667 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN} \\
 F_i &= 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$t = 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$



$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-872,167 + 0,025v + 0,00063v^2}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 39,683v - 1384392,063}$$

$$= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 1156,928)(v + 1196,611)}$$

$$= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(1156,928 - v)(v + 1196,611)}$$

$$= -42,464 \int \left(\frac{1}{1156,928 - v} + \frac{1}{v + 1196,611} \right) dv$$

$$= -42,464 (-\ln|1156,928 - v| + \ln|v + 1196,611|) + C$$

$$= -42,464 \ln \left| \frac{1196,611 + v}{1156,928 - v} \right| + C$$

$$t = -42,464 \ln \left| \frac{1196,611 + v}{1156,928 - v} \right|_{57,757}^0$$

$$= -42,464 (0,034 - 0,132)$$

$$= -42,464 (-0,098)$$

$$t = 4,161 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{57,757 - 0}{4,161} = 13,881 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 17,5%**

$$F_{rgc} = F_r - F_g$$

$$= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000$$

$$= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) -$$

$$(98 \times 226,65 \times 17,5))/1000$$

$$= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 388704,75)/1000$$

$$= -385,196 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}$$

$$F_i = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$t = 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)}$$

$$= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-927,696 + 0,025v + 0,00063v^2}$$

$$\begin{aligned}
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 39,683v - 1472533,333} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v - 1193,801)(v + 1233,484)} \\
 &= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(1193,801 - v)(v + 1233,484)} \\
 &= -41,174 \int \left(\frac{1}{1193,801 - v} + \frac{1}{v + 1233,484} \right) dv \\
 &= -41,174 (-\ln|1193,801 - v| + \ln|v + 1233,484|) + C
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -41,174 \ln \left| \frac{1233,484 + v}{1193,801 - v} \right| + C \\
 t &= -41,174 \ln \left| \frac{1233,484 + v}{1193,801 - v} \right|_{48,579}^0
 \end{aligned}$$

$$= -41,174 (0,033 - 0,113)$$

$$= -41,174 (-0,08)$$

$$t = 3,294 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{48,579 - 0}{3,294} = 14,748 \text{ km/h/detik}$$

• **Kemiringan 20%**

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r - F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) - \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 20))/1000 \\
 &= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 444234)/1000 \\
 &= -440,725 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \text{ m} \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-983,225 + 0,025v + 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 39,683v - 1560674,603}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v-1229,586)(v+1269,269)} \\
 &= 62,963 \int \frac{-1587,3 dv}{(1229,586-v)(v+1269,269)} \\
 &= -39,995 \int \left(\frac{1}{1229,586-v} + \frac{1}{v+1269,269} \right) dv \\
 &= -39,995 (-\ln|1229,586-v| + \ln|v+1269,269|) + C \\
 &= -39,995 \ln \left| \frac{1269,269+v}{1229,586-v} \right| + C \\
 t &= -39,995 \ln \left| \frac{1269,269+v}{1229,586-v} \right|_{39,42}^0 \\
 &= -39,995 (0,032-0,095) \\
 &= -39,995 (-0,063)
 \end{aligned}$$

$$t = 2,52 \text{ detik}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{39,42 - 0}{2,52} = 15,643 \text{ km/h/detik}$$

- **Kemiringan 22,5%**

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r - F_g \\
 &= ((6,3765 m + 2064 + 0,13734 mv + 0,63069 v^2) - (98 m G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069 v^2) - \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 22,5))/1000 \\
 &= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 499763,25)/1000 \\
 &= -496,254 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_t = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-1038,754 + 0,025v + 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{v^2 + 39,683v - 1648815,873} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 dv}{(v-1264,374)(v+1304,057)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 62,963 \int \frac{-1587,3 \, dv}{(1264,374 - v)(v + 1304,057)} \\
 &= -38,911 \int \left(\frac{1}{1264,374 - v} + \frac{1}{v + 1304,057} \right) dv \\
 &= -38,911 (-\ln|1264,374 - v| + \ln|v + 1304,057|) + C \\
 &= -38,911 \ln \left| \frac{1304,057 + v}{1264,374 - v} \right| + C \\
 t &= -38,911 \ln \left| \frac{1304,057 + v}{1264,374 - v} \right|_{30,243}^0 \\
 &= -38,911 (0,031 - 0,078) \\
 &= -38,911 (-0,047) \\
 t &= 1,829 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30,243 - 0}{1,829} = 16,535 \text{ km/h/det}$$

• **Kemiringan 25%**

$$\begin{aligned}
 F_{rgc} &= F_r - F_g \\
 &= ((6,3765 \, m + 2064 + 0,13734 \, mv + 0,63069 \, v^2) - (98 \, m \, G))/1000 \\
 &= (((6,375 \times 226,65) + 2064 + (0,13734 \times 226,65)v + 0,63069v^2) - \\
 &\quad (98 \times 226,65 \times 25))/1000 \\
 &= (3508,894 + 25,49v + 0,63069v^2 - 555292,5)/1000 \\
 &= -551,784 + 0,025v + 0,00063v^2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$F_i = 2 \times 271,25 \text{ kN} = 542,5 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 0,2778 \, m \int \frac{dv}{\Delta F(v)} \\
 &= (0,2778 \times 226,65) \int \frac{dv}{-1094,284 + 0,025v + 0,00063v^2} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 \, dv}{v^2 + 39,683v - 1736958,73} \\
 &= 62,963 \int \frac{1587,3 \, dv}{(v - 1298,245)(v + 1337,928)} \\
 &= 62,963 \int \frac{-1587,3 \, dv}{(1298,245 - v)(v + 1337,928)}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &= -37,911 \int \left(\frac{1}{1298,245 - v} + \frac{1}{v + 1337,928} \right) dv \\
 &= -37,911 (-\ln|1298,245 - v| + \ln|v + 1337,928|) + C \\
 &= -37,911 \ln \left| \frac{1337,928 + v}{1298,245 - v} \right| + C \\
 t &= -37,911 \ln \left| \frac{1337,928 + v}{1298,245 - v} \right|_{21,048}^0 \\
 &= -37,911 (0,03 - 0,062) \\
 &= -37,911 (-0,032) \\
 t &= 1,213 \text{ detik} \\
 a &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{21,048 - 0}{1,213} = 17,352 \text{ km/h/det}
 \end{aligned}$$



LAMPIRAN 4

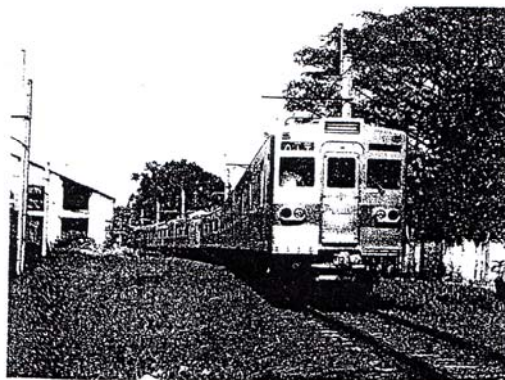
Data Teknis dan Spesifikasi

1. KRL Rheostatik T6000
2. KRL VVVF Holec BN



OUTLINE
OF
ELECTRIC RAILCAR TYPE 6000

(TRANSLATION)



KRL Hibah modified from TYPE 6000

This is prepared in accordance with the stipulations in the contract (Addendum No.1 to Contract No. 1320/PTP. KA/IP/X/99 dated December 31, 1999 for Technical Assistance on Transportation and Modification Work of Recycled Railcar from Japan), which have been translated into English and Indonesian from the original one written in Japanese published by Tokyo Metropolitan Government.



SPECIFICATION OF TYPE 6000

	OROGINAL Type 6000	MODIFIED KRL HIBAH (Ex)
Model	Type 6000	KRL HIBAH (Ex)
Gauge	1,067mm	
(Back Gauge)	990mm	1,000mm
Electric System	1,500 V DC Overhead catenary	
Train Formation	6 cars (M1C+M2+M1+M2+M1+M2C)	8 cars (M1C+M2+M1+M2 +M1+M2+M1+M2C)
Tare Weight	37.0 tons (M1C), 35.0tons (M2), 36.5tons (M1), 35.5tons (M2C)	
Passenger Capacity () Seating capacity	150 passengers (M1C & M2C), (50)	170 passengers (M1 & M2) (58)
Car Dimensions	M1C, M1: Maximum dimension:20,000mm(L)×2,800mm(W)×4,050mm(H) M2C, M2: Maximum dimension:20,000mm(L)×2,800mm(W)×3,690mm(H)	
Height of floor	1,150mm (from rail)	
Height of Passenger room	2,300mm (Distance between floor and ceiling)	
Entrance	1,300mm (Double sliding door, 4 entrance/ side)	
Distance between Bogies	13,600mm	
Coupler Height	880mm (from the Rail)	
Coupler Type	Automatic tight locked coupler, type NCB-II (End) Bar coupler, type CSE-50 (Intermediate)	
Bogie	Air spring suspension Wheel Base : 2,200mm Wheel Diameter : 860mm Center ob side beam : 1,640mm Journal diameter of Axle: 120 φ ,130 φ (4th batch)	
Driving Unit	Single Reduction system with WN type gear coupling Gear Ratio :99:16=6.19:1	
Traction Motor	100 kW/1,450rpm/340V Semi-closed, self intake type cooling system Rating Voltage : 340V Rating output: 100kW Currency:330A Revolution: 1,450rpm Weaken field (max.):35% Insulation: F	
Control System	Variable load actuator with Dynamic and air braking control Motor-driven cum shaft control Acceleration: 39 steps (series 17 steps, parallel 14 steps, weaken field 8 steps) Braking: 31 steps	
	—	Current limited
Air Brake System	Type HSC-D Brake combined with	Type HSC-D Brake combined with

OUTLINE OF TYPE 6000

	electric and air brake and interlocked with ATS system	electric and air brake
ATS System	T-Type/Multi-information type With frequency modulation	(Cut off)
Motor Compressor	MH-113R+C-2000M Vertical Type 3cylinder-2 steps	
Pantograph	Type PT-4302-A-M Rise by spring/ Descend by air	
Auxiliary Power up to 3rd Batch	(SIV) Thyristor Static Inverter (SIV) & D/D Converter Input : DC 1,500V Output: AC 200V/DC100V/DC24V Phase: 1 ϕ Frequency: 60Hz Secondary Power Source: Nickel Cd Battery 100V(20AH), 24V(20AH) (D/D Converter) for Air Conditioner	
4th Batch	(MG)	CLG-359 Motor: Input 180 kW Voltage 1,500V Current 120A Generator: Output 160 kVA Voltage 200 V Current 465 A Rotation 1,800 rpm Phase 3 ϕ Power factor 0.85
Door System	Electromagnetic air pressure type/Double sliding with belt driven system/ Door safety control with speed signal (SRD-29A)	
Head Light	12 V AC150W \times 2 Shield Beam	
Passenger Room Lighting	AC 200V 1 ϕ 60 Hz 40W (22 Lamps/car)	
Operator Cabin Lighting	AC 200V 1 ϕ 60 Hz 20W (2 Lamps/cabin)	
Ventilation	AC 200V 1 ϕ 60Hz "LineDiria"	
Air Conditioner	No description in original	
Heating System	Aluminum Sheathed Wire Type	(Cut off)
Announce System	DC 24V Interphone Type	
Speed Meter System	Induction Type	
ATS System	T Type with Multi Information	(Cut off)
Inductive Radio System	Earth Return Type	(Cut off)
Performance	Maximum Speed 100km/h	
	Acceleration 3.5 km/h/s	Acceleration 1.8 km/h/s
	Deceleration 4.0 km/h/s (On Service) 4.5 km/h/s (Emergency)	



■ TRACTION MOTOR

◆GENERAL

This Traction motor, which is of suspended type by the spring, is lightweight and high power. Every two cars are controlled as one unit and 4 traction motors are connected in permanent series. Therefore, voltage of each inlet terminal is low, 340 V, which is expected 10 % reduction of catenary voltage, 1,500V. The armature coils are of lap winding, so that this motor has capacity allowance against 2.94 times of rated voltage.

Moreover, this motor is also used for dynamic braking even in high speed.

Regarding to commutation stability, the motor is designed to provide sufficient field coil capacity against currency and weakened field 35% as minimum.

Commutator and coil are welded by TIG method. Insulation is supported by fixed epoxy resin with mica as main material.

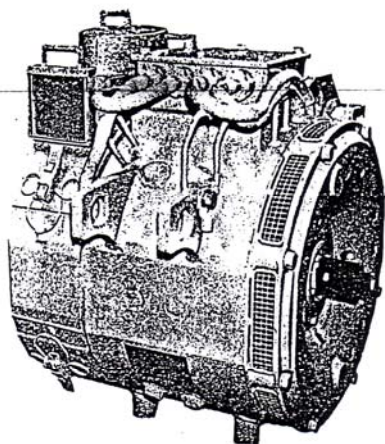
Moreover, housing has sealed bearing.

◆SPECIFICATION

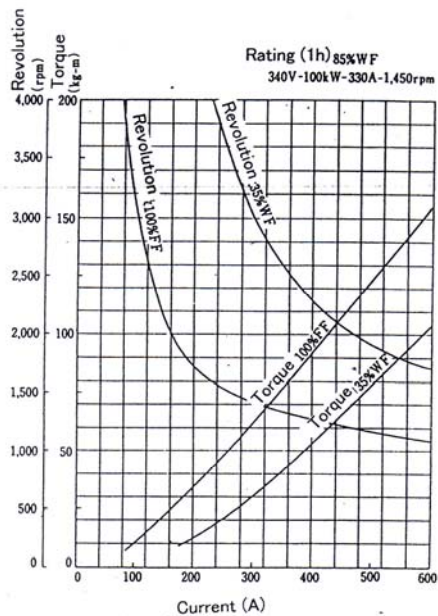
1) Type	TM-6M/TM-6H Direct current, series wound, commutating poles, Cylindrical frame, weak field control with Inductive shunt
2) One Hour Rating	
Output Capacity	100kW
Voltage	340 V
Current	330 A
Speed	1,450 RPM (at 85% field)
3) Insulation	Class F
4) Minimum Weak Field	35 %
5) Over-Voltage Limit	1,000 V at full field
6) Maximum Speed	5,000 RPM
7) Weight	720 kg



OUTLINE OF TYPE 6000



TRACTION MOTOR



TRACTION MOTOR PERFORMANCE CURVE



■ CONTROL UNIT

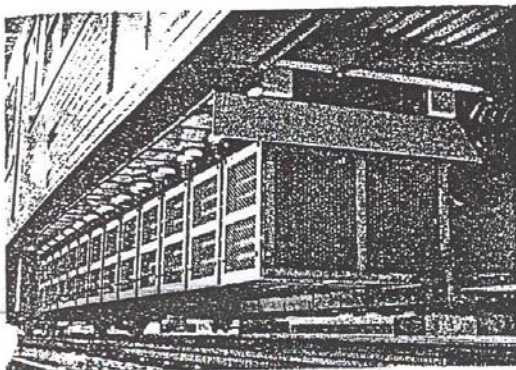
◆GENERAL

This control unit provides multi-step control system driven by pilot motor with cam-shaft controller, high performance, high acceleration and deceleration; including electro-pneumatic braking system. It is designed to provide constant acceleration and deceleration ratio even for any passenger load due to the function of load sensor device.

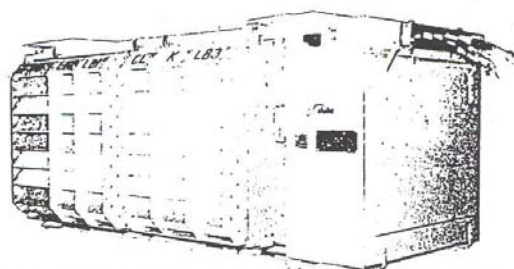
The feature of control unit is as follows.

- (1) Current of traction motor can be controlled and switched strictly within adhesive limitation. Furthermore, multiple-step is provided, so that high acceleration can be maintained constantly without slipping. This car has no slip control device.
- (2) Camshaft has resistor camshaft and "combined camshaft", which each shaft is driven directly by cam motor. Therefore, they can move responsively for the control instruction. Resistor camshaft has 36 positions per one rotation and "combined camshaft" has 24 positions per one rotation.
- (3) In order to keep quick response by steep current standing up in the initial dynamic braking stage, this system provides the way to pre-excite the motor directly by catenary. In order to increase braking step during dynamic braking, moreover, main resistor is controlled by series/parallel connection.
- (4) For keeping high reliability, maintainability and miniaturization, load sensor device, braking regulator and cam motor are provided with electro technology, which are non-contact device.
- (5) Cam motor circuit is provided with thyristor. Detecting main circuit current through DC transformer, the cam motor is controlled by the gate control instruction from thyristor in magnetic amplifier.
- (6) The Control device is small, lightweight and high reliable due to small sized cam contactor, shunt less relay and non-contact devices even though the system has multiple control steps.
- (7) Protecting relay provides balanced rotary moving parts which have high sensitivity, high stability and high reliability.
- (8) Main resistor is waved ribbon type with self cooling ventilation. The heat body has large shield plate (200mm width) on both sides, which protects the surrounding environment against heating.

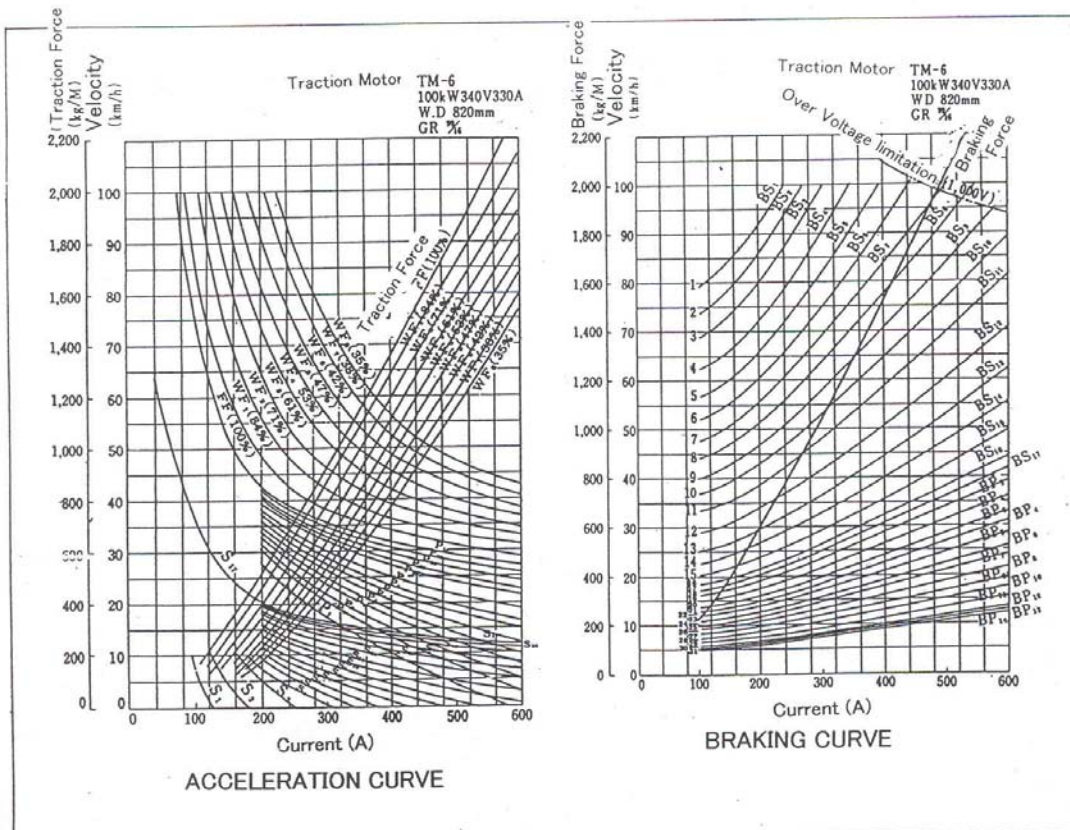
OUTLINE OF TYPE 6000



MAIN RESISTOR



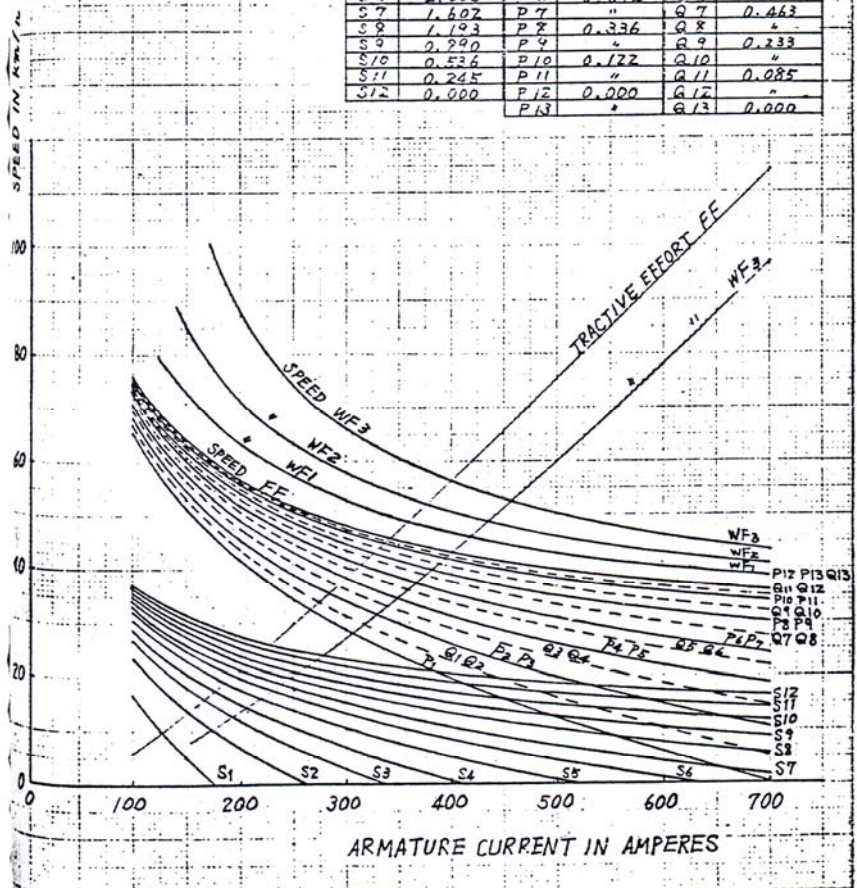
CIRCUIT BREAKER



NOTCHING CURVES FOR POWERING

TRACTION MOTOR 120 kW (375 V, 360 A)
 GEAR RATIO 5.60 (84/15)
 WHEEL DIA. 860 mm (Cal. 820 mm)
 LINE VOLTAGE 1500 V

SERIES		PARALLEL	
RESISTANCE NOTCH VALUE (at 170°C)	MOTOR	RESISTANCE NOTCH VALUE (at 170°C)	MOTOR
S 1 8.022	P 1 1.948	Q 1 1.624	
S 2 5.332	P 2 1.413	Q 2 "	
S 3 4.044	P 3 "	Q 3 1.181	
S 4 3.245	P 4 0.986	Q 4 "	
S 5 2.519	P 5 "	Q 5 0.778	
S 6 2.003	P 6 0.622	Q 6 "	
S 7 1.602	P 7 "	Q 7 0.463	
S 8 1.193	P 8 0.336	Q 8 "	
S 9 0.990	P 9 "	Q 9 0.233	
S 10 0.526	P 10 0.172	Q 10 "	
S 11 0.245	P 11 "	Q 11 0.085	
S 12 0.000	P 12 0.000	Q 12 "	
	P 13 "	Q 13 0.000	



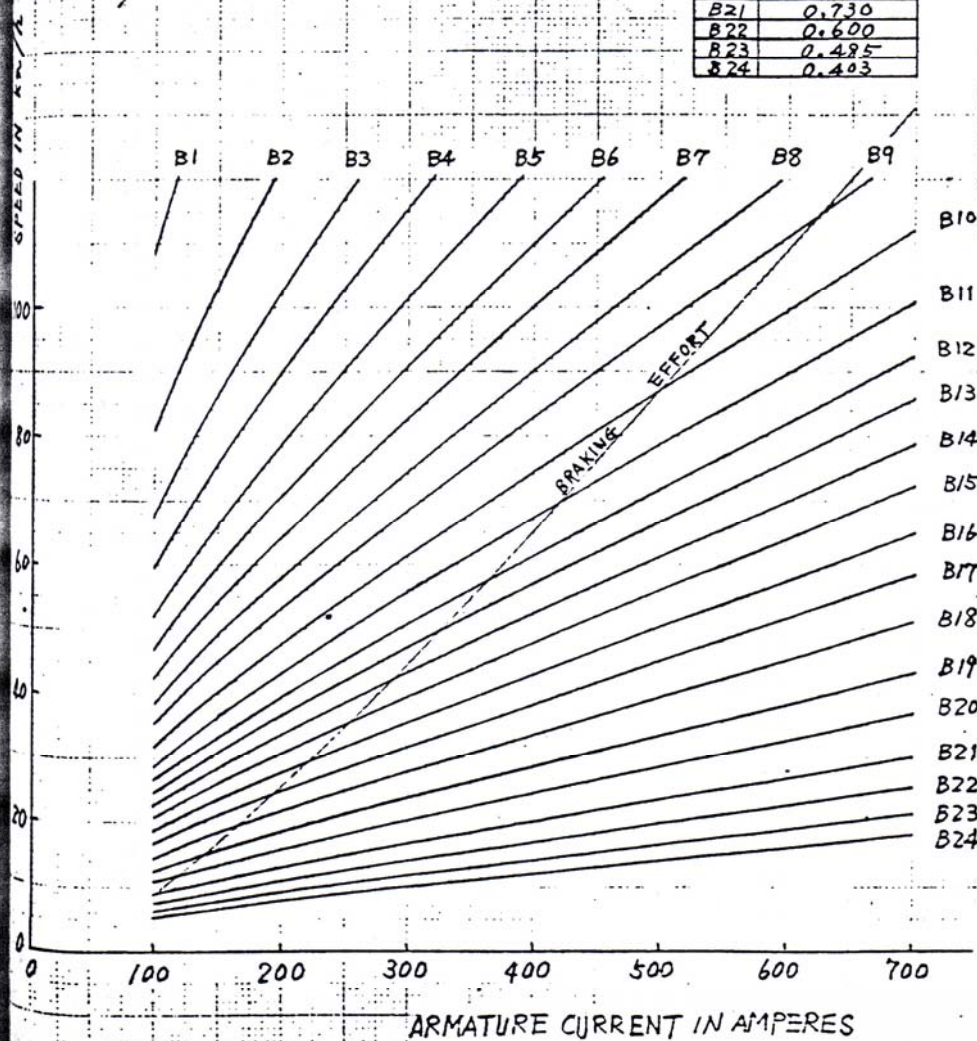
NOTCHING CURVES FOR DYNAMIC BRAKING

TRACTION MOTOR 120kW (375 V, 360 A)

GEAR RATIO 5.60 (84/15)

WHEEL DIA. 850 mm. (Cal. 820 mm)

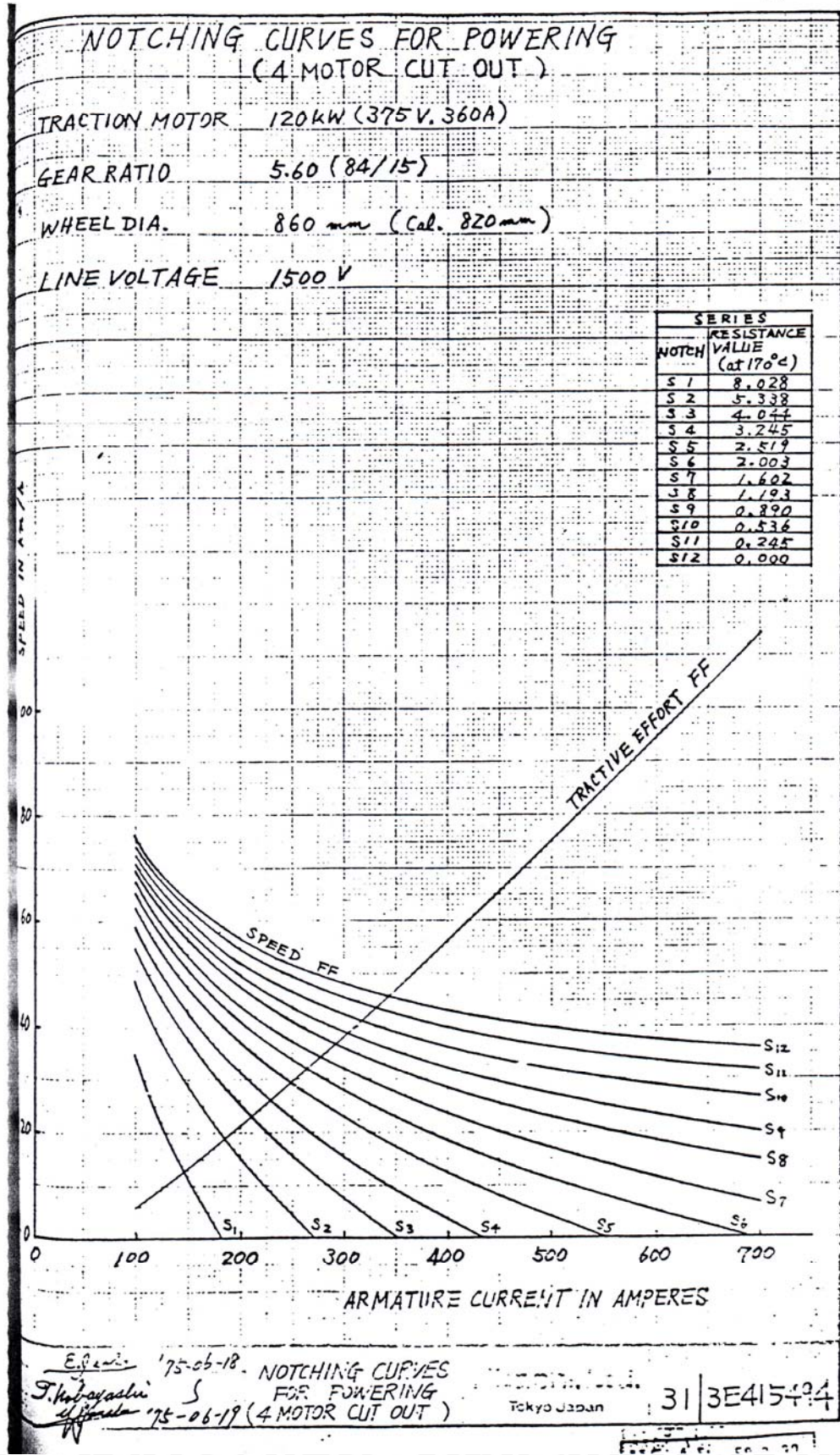
NOTCH	RESISTANCE VALUE (at 170°C)
B1	10.462
B2	7.772
B3	6.478
B4	5.679
B5	4.953
B6	4.437
B7	4.036
B8	3.627
B9	3.323
B10	2.970
B11	2.678
B12	2.432
B13	2.254
B14	2.061
B15	1.876
B16	1.676
B17	1.487
B18	1.291
B19	1.082
B20	0.908
B21	0.730
B22	0.600
B23	0.485
B24	0.403



E. J. J. '75-06-18
 J. Holayastri '75-06-19
 NOTCHING CURVES FOR DYNAMIC BRAKING

31 | 3E415493

MF | AP. 5C 9.30



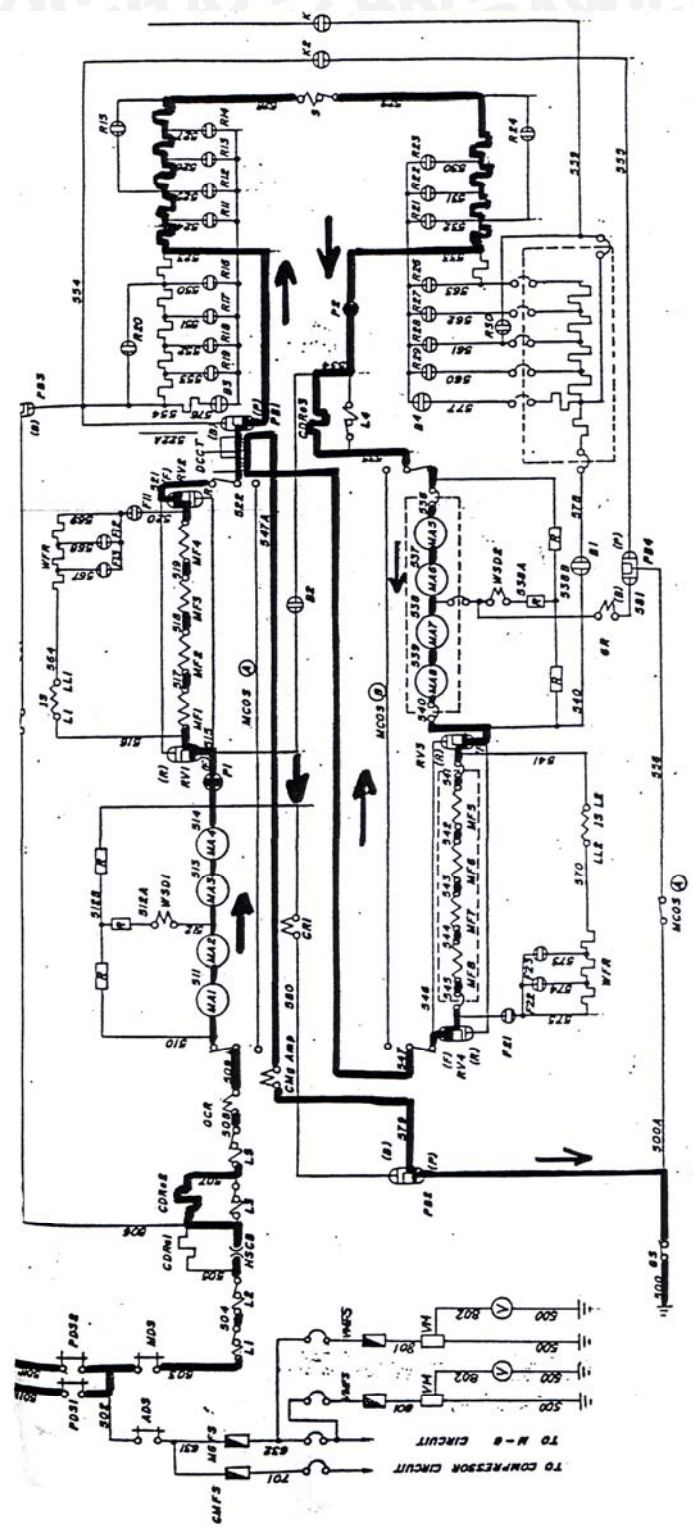


Fig. 3.1.1 CURRENT PATH IN S1a NOTCH



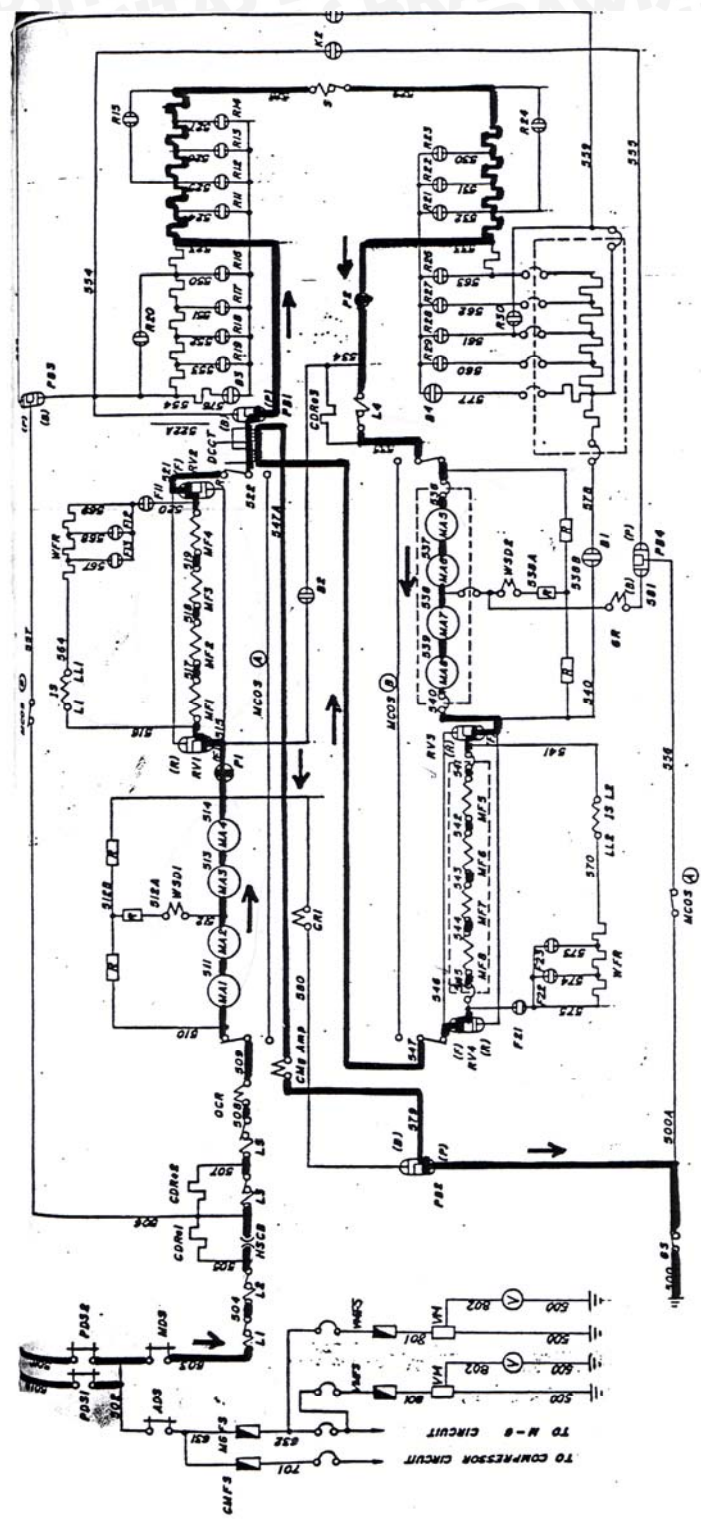


Fig.3.1.2 CURRENT PATH IN Series NOTCH
(Final in "I" Notch)

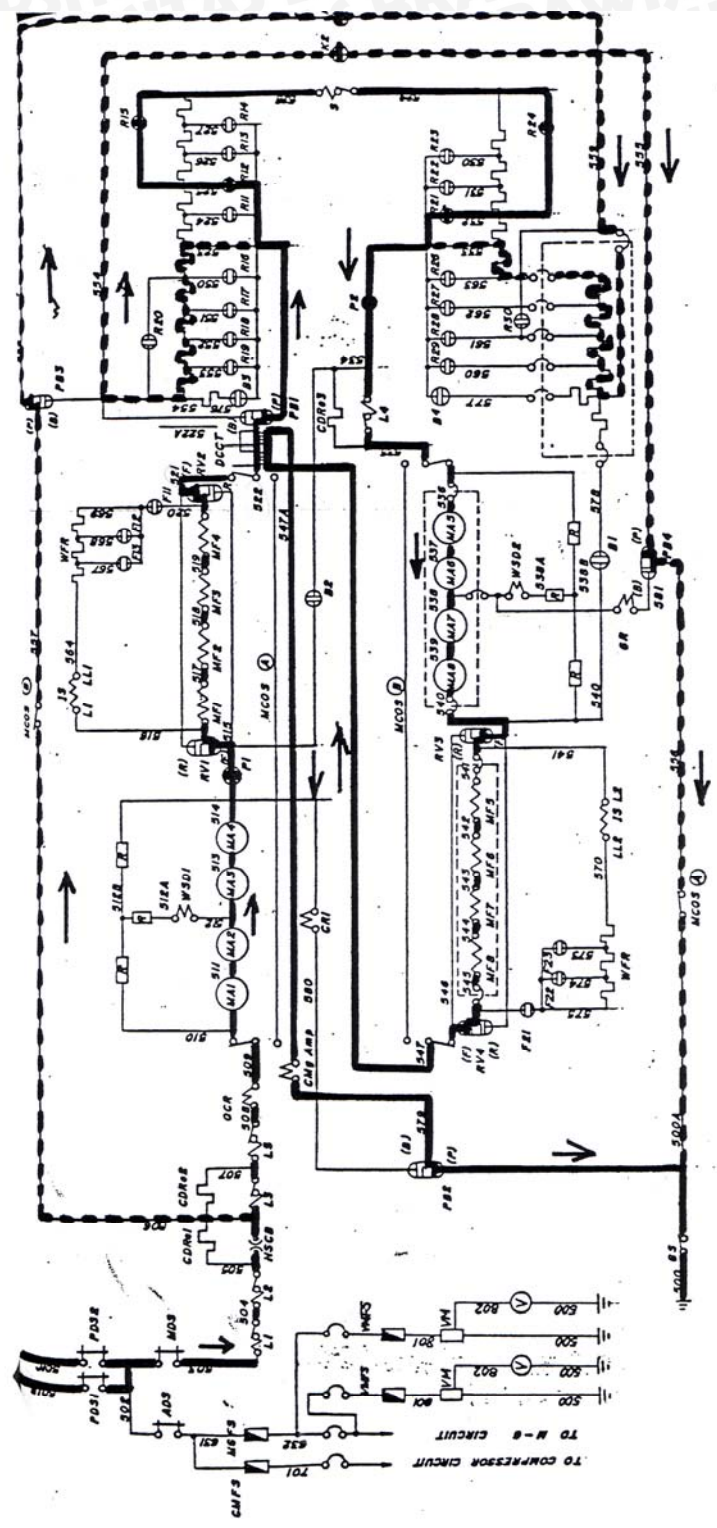


Fig.3.1.3 CURRENT PATH IN TRANSITION

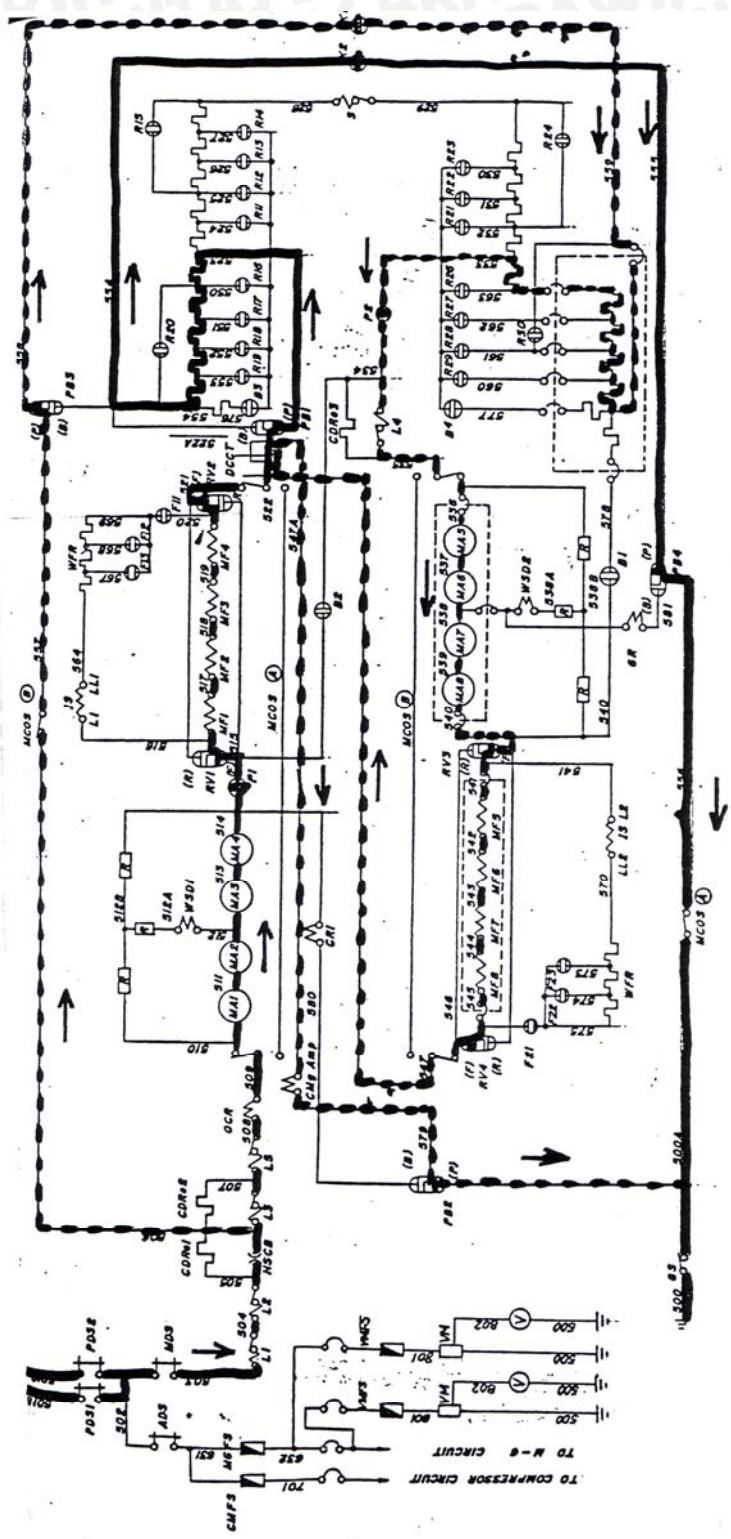


Fig.3.1.4 CURRENT PATH IN Parallel NOTCH

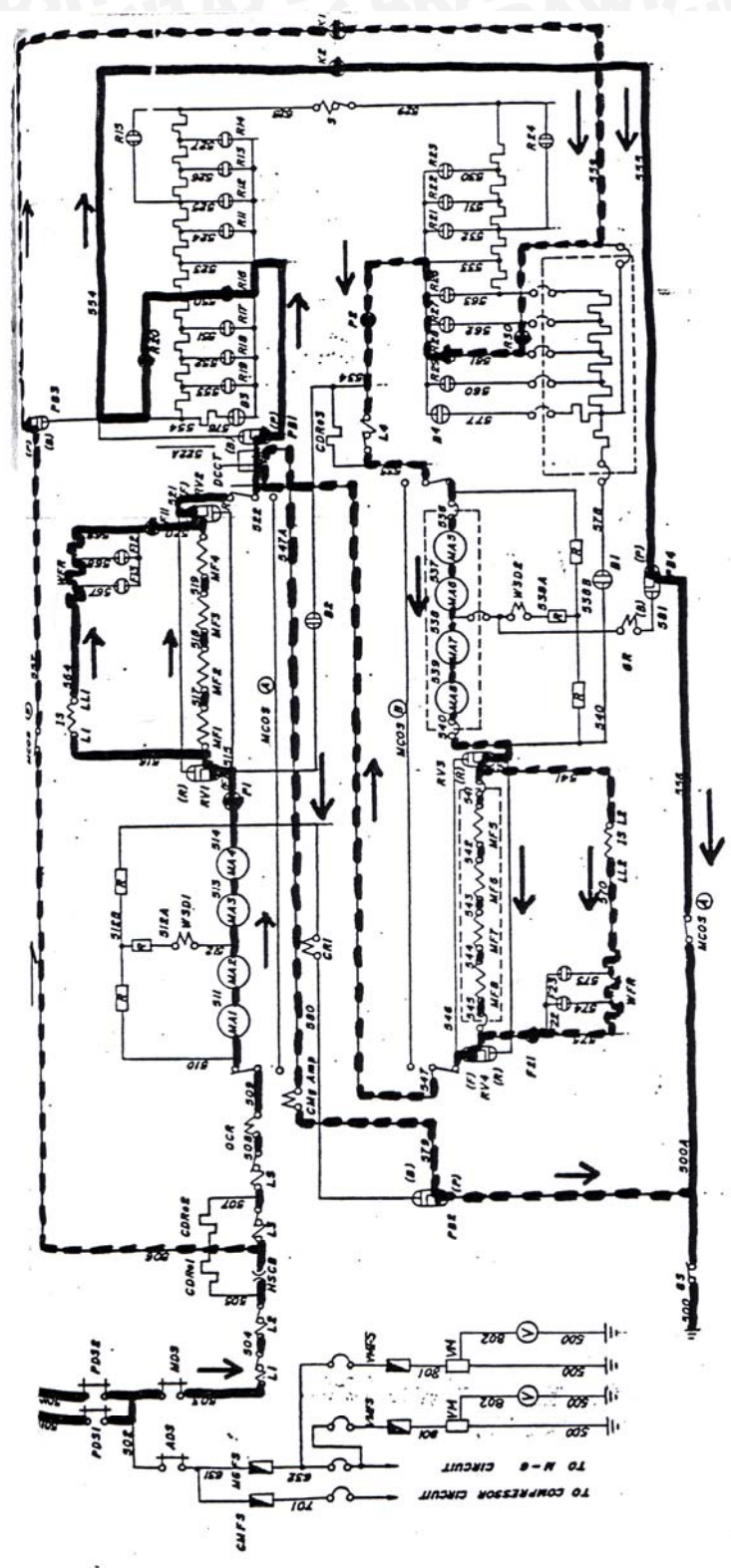


Fig.3.1.5 CURRENT PATH IN WF NOTCH

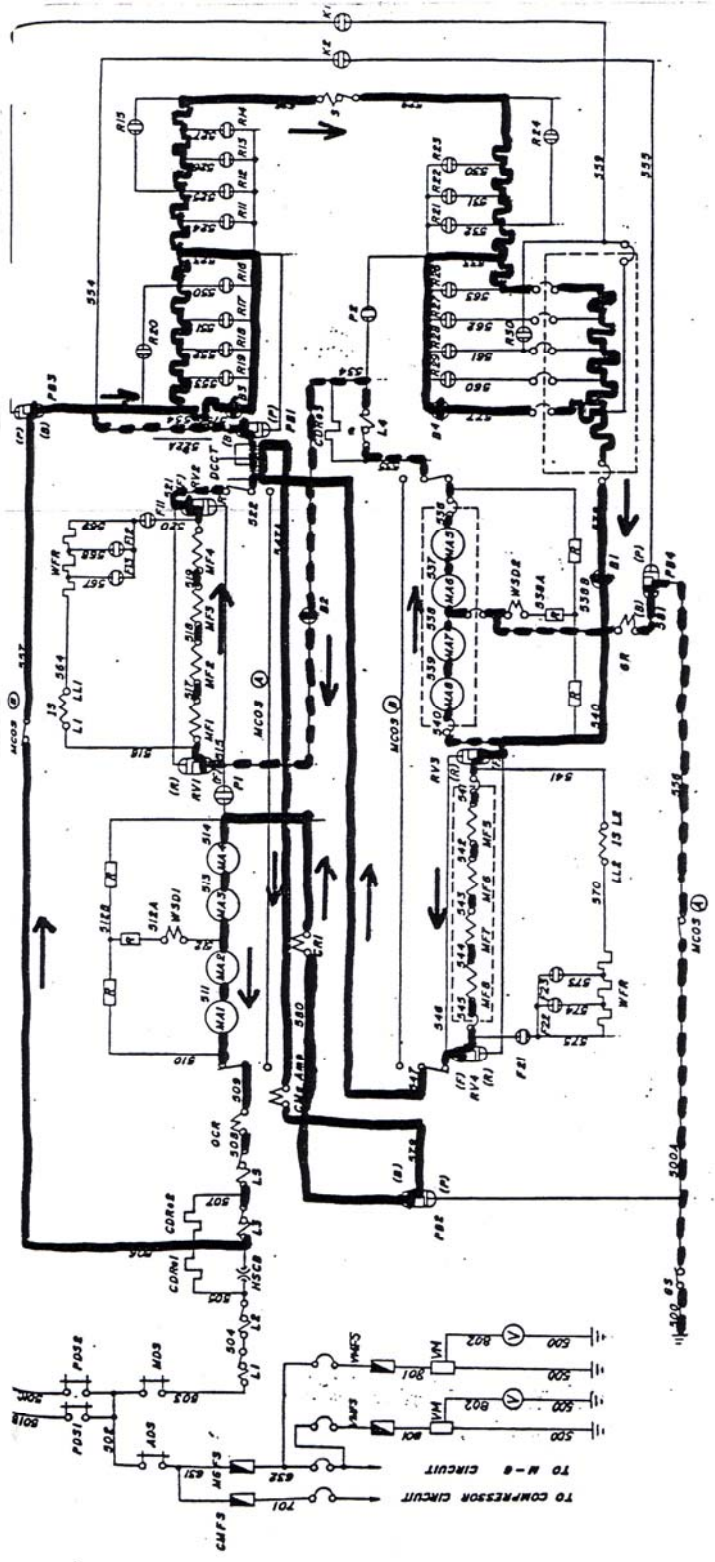


Fig.3.1.6 CURRENT PATH IN Rheostatic Braking

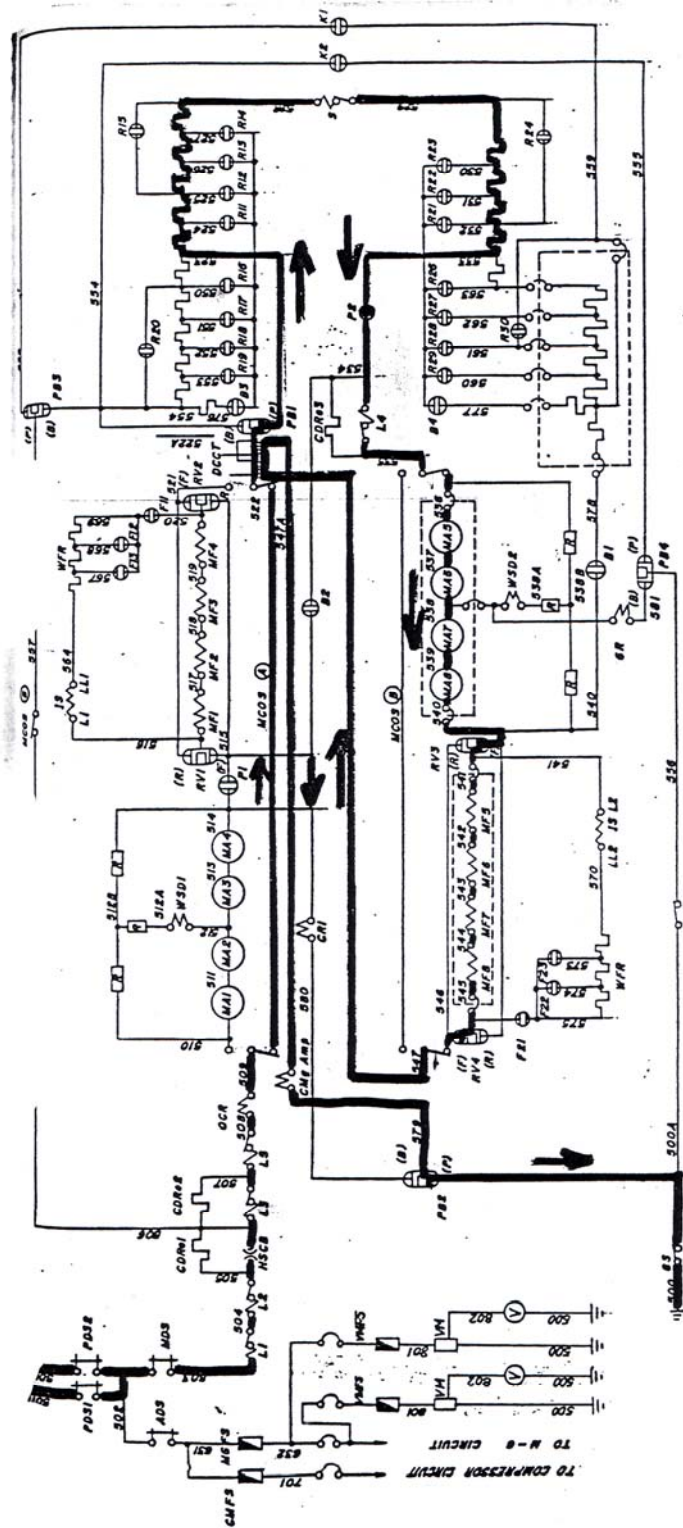


Fig.3.1.7 CURRENT PATH 1~4 Motors Cut Out



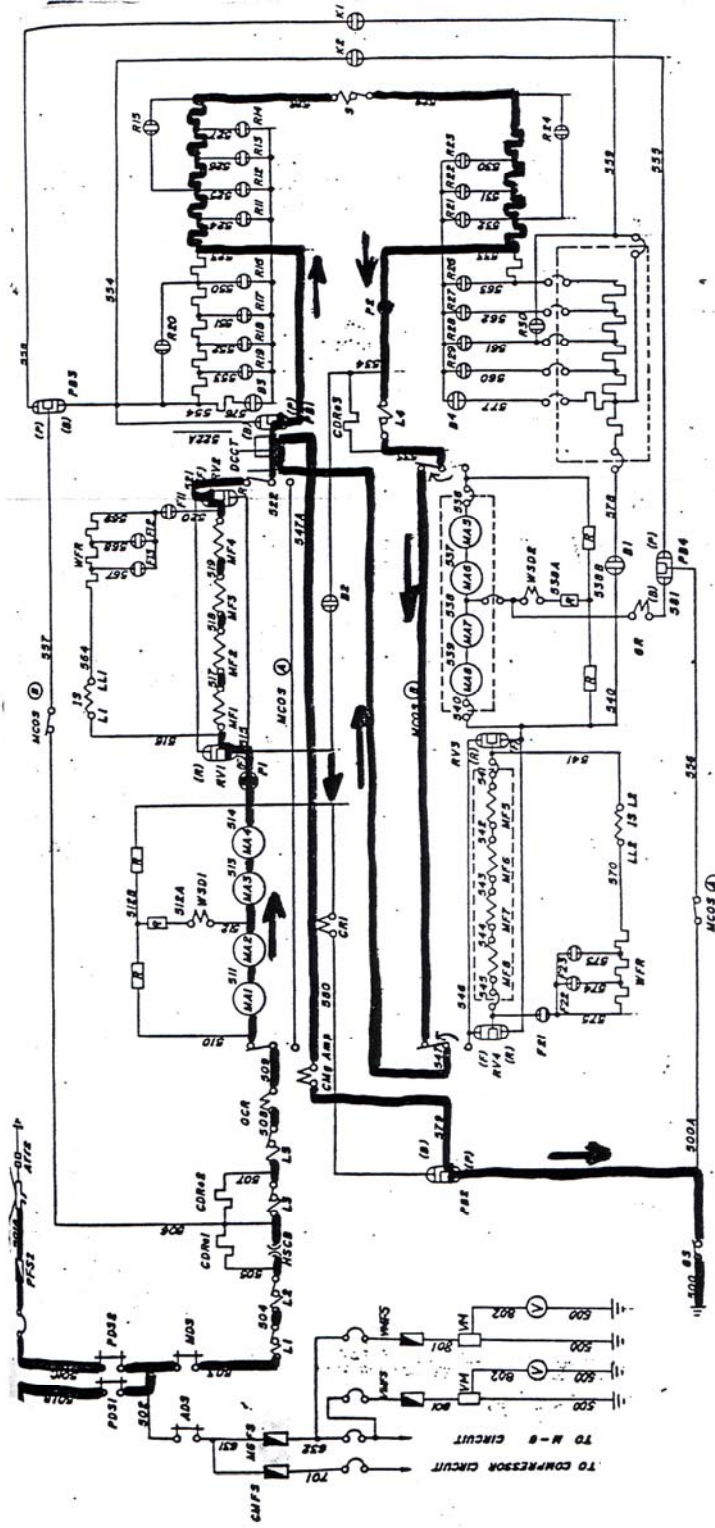


Fig.3.1.8 CURRENT PATH IN 5~8 Motors Cut Out



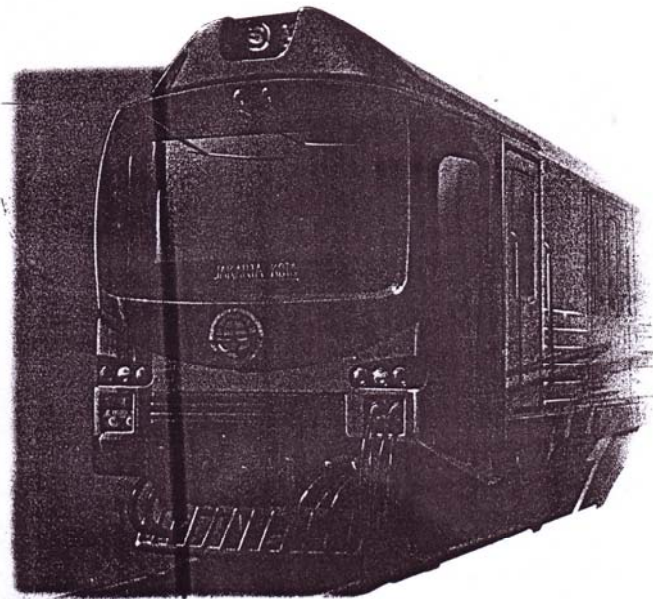


BN / HOLEC

consortium for commuter trains Indonesia

PHASE 2

SUBURBAN COMMUTER TRAIN FOR THE JABOTABEK AREA



TRAIN OPERATING MANUAL



GENERAL CHARACTERISTICS

	Motor cars	Trailer cars
Carbody length	20 m	20 m
Car width	2990 mm	2990 mm
Train set (over coupler)	82,21 m	82,21 m
Total height	3820 mm	3820 mm
Roof height	3450 mm	3450 mm
Deck pivot pitch	14 m	14 m
Floor height, above rail	1100 mm	1100 mm
Doors: Sliding doors		
Clear width	1300 mm	1300 mm
Seats	80	54
Total of passengers		
Including standees at 8 pass/m ²	284	302
Weight, empty	39000 kg	32000 kg

Bogies

Type	1B1 bolsterless bogie
Primary suspension	conical rubber blocks
Secondary suspension	air spring
Track gauge	1067 mm
Wheel base (motor and trailer bogies)	2300 mm

Brake system

Type: Knorr Kbr XI.
 Electro-pneumatic digitally controlled friction brake system with two tread brake units per wheel.
 Electronic Anti-skid system: Mannesmann WGMC.
 Air-operated emergency brake.
 Parking brake: spring applied/air released on trailer bogies.

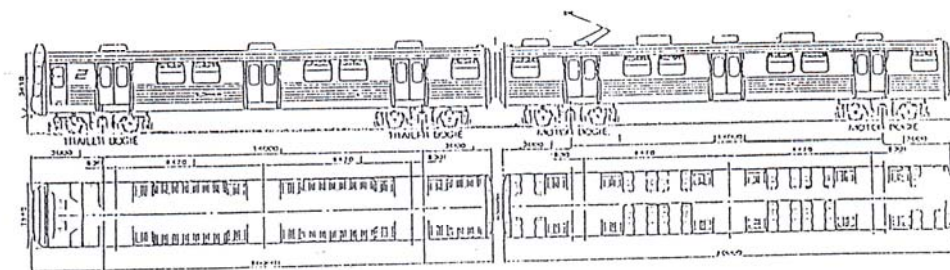
Coupling

Tight lock automatic front couplers AAR Type H
 Permanent coupling bars between the cars of one train set

Performances

Maximum speed	100 km/h
Initial acceleration at normal load	0.8 m/sec ²
Service brake deceleration	0.8 m/sec ²
Emergency brake deceleration	1 m/sec ²

These suburban electric 4-car units consist of 2 motor cars between trailers with driver's cab. Operation in multiple units up to 3 trainsets is possible. The building conception is modular, the vehicles are specially designed to facilitate local production and assembly. GRP outside bodyends and bonded stainless steel outside lining reduce maintenance and risk of corrosion. Seven four-car trainsets have been delivered for suburban services in Jakarta. These trains have been supplied under a technology transfer agreement which will see a further 25 sets progressively built by PT Inka, rolling stock manufacturer in Madiun, Indonesia.



Half trainset.

Section 1

Technical description and specification

2 Technical data

Electrical data

Asynchronous traction motor model	:	DMKT 55/18.5
<u>Nominal operation:</u>		
Voltage	:	1716 V AC at 56 Hz
Current	:	66 A at 56 Hz
Output	:	155 kW
Design power factor	:	0.84
Speed	:	1659 r.p.m.
<u>Inverter supply:</u>		
Voltage	:	0 - 1950 V AC
Current	:	60.2 A
Output	:	146 kW
Operating mode	:	S9
Frequency	:	0 - 133 Hz
Speed	:	0 - 4174 r.p.m.
No. of stator poles	:	4
Stator connection	:	Star
Maximum current	:	115 A
U _{max} rel. to earth	:	3000 V
Magnetic pull factor	:	4.95
Stator winding insulation class	:	H, VPI
Pulse generator	:	Hern, FGL 02001

Mechanical data

Maximum torque	:	1500 Nm
Maximum torque incl. recipr. torque	:	2210 Nm
Short-circuit torque	:	10000 Nm
Cooling air supply	:	650 m ³ at 1950 r.p.m.
Max. ambient temperature	:	40 °C
Degree of protection	:	IP 23 (IEC 34-5)
Total mass	:	830 kg
Rotor mass	:	155 kg
Mass moment of inertia	:	2.2 kgm ²
Balancing	:	Dynamic, on clamping rings
Air slit	:	1.2 mm
Bearing lubrication	:	Shell Alvania R3
Cooling fan	:	Radial, aluminium, dynamically balanced
Suspension	:	Resilient (rubber ball elements)
Connecting cable	:	Samiflex, 16 mm ² -3.3 kV

Ç HOLEÇ H	TI-00-1-1-3
FEBRUARY 1995	ISSUE 1



DESCRIPTION OF TRAIN AND CONTROLS	SECTION 2	PAGE 1
	DATE: 30-09-1996	PH2
<p>1. SPECIFICATIONS</p> <p>1.1 GENERAL DESCRIPTION</p> <p>The suburban commuter train for the Jabotabek area is a light electric trainset, consisting of four car units: two trailer cars (TC1 and TC2) and two motor cars (MC1 and MC2). See Fig. 2-1 for general lay-out.</p> <p>The trailer cars are located at both ends of the trainset and each of them contains a driver's cab. The two motor cars are situated between the trailer cars and each of them is fitted with a pantograph.</p> <p>All the cars are of the same type : KL3 (vehicles of class 3). To identify each car separately the type number KL3 is completed by phase II 96 (the year of construction) and by the car serial number.</p> <p>Although both trailer cars may look identical, there are some differences between them which make it impossible to change their position in the trainset, i.e. a TC1 must always be coupled to an MC1 and a TC2 to an MC2. Furthermore, it is not allowed to operate a trainset with two TC1 cars or with two TC2 cars, instead of one TC1 and one TC2 car.</p> <p>The trainset can be operated as a single unit of 4 cars or as a multiple unit (maximum 3 trainsets or 12 cars).</p>		
<p>Fig. 2-1 — General lay-out of the trainset</p>		

DESCRIPTION OF TRAIN AND CONTROLS	SECTION 2	PAGE 2
	DATE: 30-09-1996	PH2
<p>1.2 TECHNICAL DATA</p> <p>1.2.1 Dimensions</p> <p>Length</p> <p>Trailer car body 20.000 m Motor car body 20.000 m Trainset (over couplers) 82.210 m</p> <p>Width</p> <p>Car 2.990 m</p> <p>Height</p> <p>(from top of rail/empty load/new wheel) 3.450 m</p> <p>Pantograph Latched down 3.784 m Minimum operating 4.250 m Maximum operating 5.700 m</p> <p>Floor 1.100 m</p> <p>Movable step 765 mm</p> <p>Coupler 775 mm</p> <p>Bogie base</p> <p>Trailer car 14.000 m Motor car 14.000 m</p> <p>Wheel base</p> <p>Trailer bogie 2.300 m Motor bogie 2.300 m</p> <p>Wheel diameter</p> <p>New 860 mm Worn 800 mm</p> <p>Passenger doors</p> <p>Number per side and per car 3 double Clear width 1.300 m Clear height 1.800 m</p>		

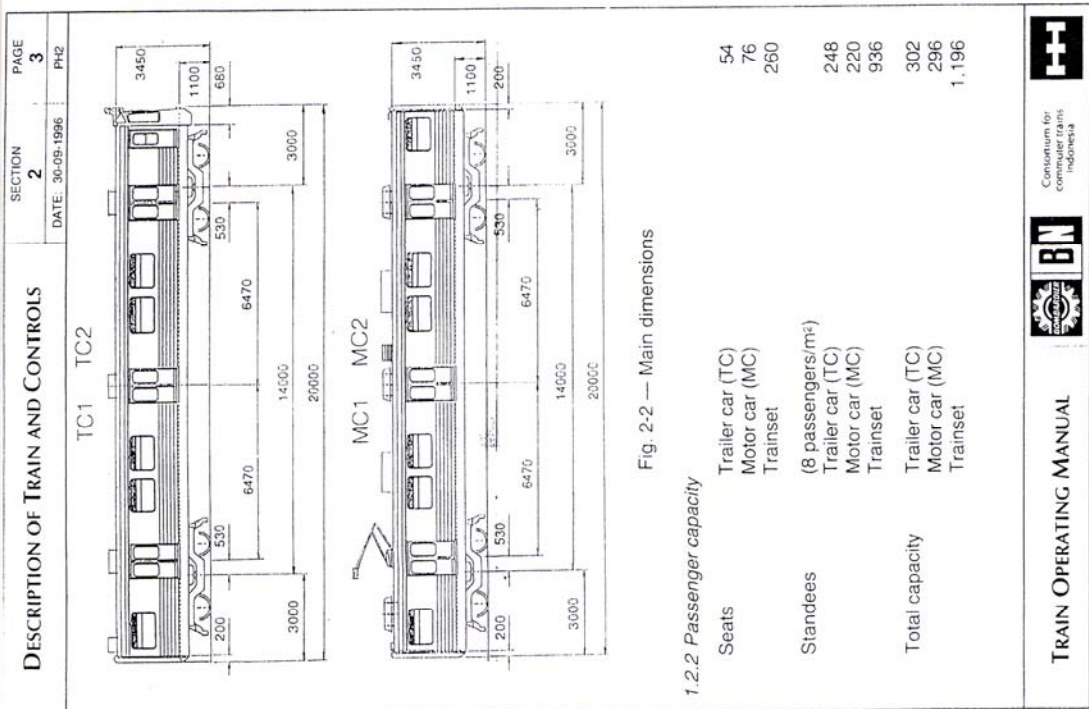
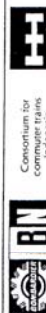


Fig. 2-2 — Main dimensions

<p style="text-align: center;">DESCRIPTION OF TRAIN AND CONTROLS</p> <p style="text-align: center;">SECTION 2 PAGE 4 DATE: 30-09-1996 PH2</p> <p>1.2.3 Performances</p> <ul style="list-style-type: none"> Max. service acceleration 0.8 m/s² Max. service deceleration 0.8 m/s² Emergency deceleration 1.0 m/s² Max. operating speed 100 km/h <p>1.2.4 Tare weight</p> <ul style="list-style-type: none"> Trailer car TC1 33,450 kg Trailer car TC2 34,100 kg Motor car 40,680 kg Trainset 148,910 kg <p>1.2.5 Brake system</p> <ul style="list-style-type: none"> Service brake (> 5 km/h) electrodynamic brake Service brake (< 5 km/h) mechanical air brake Emergency brake mechanical air brake Parking brake spring applied-air released Anti-skid system installed on the wheel axles <p>1.2.6 Traction equipment</p> <ul style="list-style-type: none"> Traction motor 3 ph. Squirrel cage induction motor Power 155 kW Rotational speed 1,659 rpm Number 4 per motor car Ratio 1 : 6.12 Type single arm Number 1 per motor car Line voltage 1,000 - 2,000 V DC Line current 560 A_{eff} Electrical power accelerating (motor side) 783 kW braking (motor side) 1,128 kW Number 1 per motor car 	<p style="text-align: center;">TRAIN OPERATING MANUAL</p> <p style="text-align: center;"> <small>Consortium for commuter trains Indonesia</small> </p>
--	---

DESCRIPTION OF TRAIN AND CONTROLS		SECTION 2	PAGE 5
		DATE: 30-09-1996	PH2
1.2.7 Low voltage power supply			
Static converters	Input from overhead line AC Output Power nominal Power maximum DC Output (TC1 only) Power nominal Power maximum Battery charger (TC2 only) Power nominal Power maximum	1,500 V DC 380/220 VAC 50 Hz 15 kW 35 kW 110 V DC 9 kW 9 kW 137 V DC 7 kW 7 kW	
Battery	Location Type Capacity Output voltage	under TC2 NiCd 100 Ah at 5 hours 110 V DC	



DESCRIPTION OF TRAIN AND CONTROLS		SECTION 2	PAGE 6
		DATE: 30-09-1996	PH2
2. DRIVER'S CABIN			
2.1 LAY-OUT			
A driver's cabin is provided at one end of both trailer cars. It is equipped with a set of instruments and accessories to allow easy control and operation of the trainset.			
The driver's cabin consists of the following main parts: (see Fig. 2-3)			
<ul style="list-style-type: none"> • Partition wall (1) • Entrance doors (2) • Windows (3) • Driver's desk (4) • Seats (5) • Destination panel holder (6) • Head and signal lights (7) 			
		<p>Fig. 2-3 — Lay-out of driver's cabin</p>	

