



ANALISIS BATAS KECEPATAN KRITIS KELUAR REL DI LENGKUNGAN R60 DENGAN KONDISI TIDAK ADA PELEBARAN DAN PENINGGIAN PADA PROYEK LRT

(ANALYSIS OF CRITICAL SPEED LIMIT OUT OF RAILS IN R60 CURVE WITHOUT WIDENING AND ELEVATION ON THE JAKARTA LRT PROJECT)

Ikhsan Rahmat Fadillah¹⁾, Sudarwati²⁾

^{1),2),3)}Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jayabaya

^{1),2),3)}Jalan Raya Bogor Km.28, Cimanggis, Jakarta Timur

e-mail: ¹⁾ikhsanrfadill@gmail.com, ²⁾sudarwati1952@gmail.com

Diterima: dd mm yyyy ; direvisi: dd mm yyyy; disetujui: dd mm yyyy; diterbitkan online: dd mm yyyy.

ABSTRAK

LRT menggunakan jenis lintasan layang. jalurnya tidak hanya lurus melintang, tapi juga menikung. Pada tikungan, kereta akan terpengaruh oleh gaya sentrifugal, kereta akan terlempar ke arah luar. Dengan adanya radius 60 meter pada lintasan kereta LRT, terjadi getaran dan bunyi yang cukup kencang di kabin masinis, akibatnya pihak operasional LRT menurunkan kecepatan desain dari 20 km/j menjadi 10 km/j.

Kecepatan kereta yang rendah berdampak pada kedatangan kereta terlambat terutama pada saat jeda waktu keberangkatan antar kereta (headway) yang lebih cepat. Dari hasil survei yang telah dilakukan di lapangan pada lengkungan tersebut roda dan rel sudah terkikis (aus) dengan ditemukannya gram akibat gesekan antara roda dan rel dikarenakan Jarak gandar roda lebih besar dari pada d_{ab} rel akibatnya kereta berjalan mepet (Spiezgang) meskipun jalur tersebut dibuat pelebaran maksimum 20 mm sesuai Peraturan Menteri Perhubungan No.60.

Kecepatan kritis kereta masih lebih tinggi, yaitu 48 km/jam atau terdapat selisih perbedaan sebesar 38 km/jam dengan batas kecepatan yang diterapkan saat ini yaitu 10 km/jam. Sebagai upaya peningkatan kecepatan dan menghindari tergulingnya LRV sebaiknya pada lintasan lengkung dengan radius yang kecil dilakukan peninggian (cant) dan pelebaran sepur guna mengurangi keausan yang berlebihan pada roda. Serta perlu adanya perawatan khusus menggunakan lubrikasi pada titik tersebut untuk mengurangi gaya gesekan. Agar dapat mengoptimalkan kinerja LRV penulis menyarankan penambahan kecepatan kereta kembali pada kecepatan awal desain yaitu maksimal 20 km/jam.

Kata Kunci: *lintasan laying, gaya sentrifugal, aus, gram, wheelbase*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pemerintah DKI Jakarta telah mempersiapkan pembangunan kereta rel listrik dengan angkutan cepat terpadu yang cocok untuk perkotaan atau biasa disebut dengan Light Rail Transit (LRT), lintasannya LRT menggunakan jenis lintasan layang. LRT Jakarta sendiri memiliki tujuh koridor.

Tentu jalurnya tidak hanya lurus melintang, tapi juga menikung. Tipe rel yang digunakan adalah R54E1 dan menggunakan standar gauge 1435 mm.

Pada tikungan, kereta akan terpengaruh oleh gaya sentrifugal, akibatnya kereta akan terlempar ke arah luar. Agar aman, maka terdapat dua solusi; solusi yang pertama adalah mengurangi kecepatan kereta, sedangkan solusi yang kedua adalah dengan meninggikan atau melebarkan sepur rel kereta. Di dalam tugas akhir ini solusi yang akan dibahas untuk mengimbangi gaya sentrifugal adalah solusi yang pertama. Akibat kecepatan kereta yang rendah terkadang kedatangan kereta terlambat terutama pada saat jeda waktu keberangkatan antar kereta (*headway*) yang lebih cepat. Untuk mengetahui kecepatan kereta yang optimal perlu dicari terlebih dahulu kecepatan kritis kereta agar mobilitas kereta dapat meningkat dengan menaikkan kecepatan di atas batas kecepatan tanpa melewati batas kritis, yang dapat menyebabkan kereta terguling. Oleh karena itu, perlu dicari kecepatan kritis kereta di lintasan lengkung pada kondisi rel R60 tanpa adanya peninggian dan pelebaran sepur.

Pada kondisi yang sama, pada lengkungan tersebut jalannya kereta tidak mulus saat melewati lengkung tersebut akibatnya terdengar suara kontak antara roda dan rel serta getaran yang mengganggu kenyamanan penumpang, pengecekan dilapangan oleh petugas ditemukan adanya keausan rel dan roda di tikungan tersebut. Oleh karena itu perlu dicari penyebab dari getaran dan bunyi yang dihasilkan oleh tikungan tersebut serta penyebab keausan rel dan roda.

Identifikasi Masalah

1. Pada area mainline (lintasan yang dilalui LRT untuk mengangkut penumpang), lengkungan radiusnya paling kecil yaitu Radius 60 meter (R60).
2. Tidak adanya pelebaran dan peninggian pada lengkungan R60 sehingga mengakibatkan roda dan rel menjadi aus.
3. Kecepatan di lengkungan R60 (radius 60 meter) dibatasi maksimal 20 km/jam sehingga berpengaruh terhadap waktu tempuh operasi.
4. Tidak terdapat lengkung peralihan pada lengkung tersebut.

Rumusan Masalah

1. Berapakah kecepatan kritis kereta pada lintasan lengkung dengan jenis rel R54E1 yang memiliki lebar sepur 1,435 meter serta radius lengkung 60 meter tanpa adanya peninggian atau pelebaran sepur di PT. LRT Jakarta?
2. Apakah memungkinkan untuk menambah kecepatan kereta pada lintasan lengkung dengan jenis rel R54E1 yang memiliki lebar sepur 1,435 meter serta radius lengkung 60 meter tanpa adanya peninggian dan pelebaran sepur di PT. LRT Jakarta?
3. Berapakah kecepatan yang aman untuk operasional LRT ?
4. Berapakah peninggian dan pelebaran sepur yang sesuai dengan standar teknis dan Peraturan Pemerintah ?

Batasan Masalah

1. Studi ini dilakukan hanya pada wilayah PT. LRT Jakarta sebagai operator penyedia jasa transportasi berbasis rel
2. Studi ini hanya dilakukan pada lintasan lengkungan R60 yang berada pada lintasan operasional LRT untuk membawa penumpang (mainline), lengkungan Radius 60 meter adalah lengkungan terkecil di mainline.

3. Mengkaji faktor yang mempengaruhi anjlogen atau keluar rel, karena dampak keluar rel sangat merugikan bagi perusahaan jika terjadi.
4. Hanya mengkaji tentang pengaruh kontak roda dengan rel di dan batas kecepatan kritis keluar rel serta mencari batas peninggian dan pelebaran sepur yang sesuai, tidak merencanakan bagaimana metode pemasangan ataupun dengan memberikan solusi lain untuk menambah kecepatan operasional.

Tujuan Penelitian

1. Mengetahui kecepatan kritis kereta pada lintasan lengkung dengan jenis rel R60 yang memiliki lebar sepur 1,435 meter serta radius lengkung 60 meter tanpa adanya peninggian atau pelebaran sepur di PT. LRT Jakarta.
2. Memutuskan ada atau tidak adanya kemungkinan peningkatan kecepatan kereta pada lintasan lengkung dengan jenis rel R60 tanpa adanya peninggian atau pelebaran sepur di PT. LRT Jakarta serta menentukan besarnya agar dapat melaju secara optimal tanpa mengabaikan kenyamanan penumpang untuk menghindari keterlambatan headway di PT. LRT Jakarta.

Manfaat Penelitian

1. Memberikan saran dan sumbangan pikiran dalam bidang ilmu pengetahuan terkait dengan permasalahan yang terjadi.
2. Memberikan kejelasan batas kecepatan yang aman untuk dilalui kereta LRT.
3. Memberikan masukan-masukan kepada PT. LRT Jakarta terkait dengan rencana pelebaran dan peninggian sepur di lengkungan R60
4. Memberikan usulan perencanaan pengadaan lubrikator untuk lengkungan pada radius kecil

KAJIAN PUSTAKA

Aspek Legalitas

Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 tentang persyaratan teknis Jalur Kereta Api.

1. Kecepatan dan Beban Gandar
2. Beban gandar
3. Kelas Jalan Rel
4. Lebar Jalan Rel 1435 mm
5. Kelandaian
6. Lengkung vertical
7. Lengkung Horizontal
8. Pelebaran Jalan Rel
9. Peninggian Jalan Rel

Landasan Teori

1. Dokumen kontraktor

Dari dokumen *Technical Specification Cant Data Book* yang disusun oleh PT. Wijaya Karya dengan mempertimbangkan data-data yang telah tercantum di atas, diperoleh besar batas kecepatan kereta dengan menggunakan persamaan berikut.

$$V_{\max} = 0.29 \sqrt{R(Ea + D)}$$

$$D = \frac{2h_G}{G} \left(\frac{v^2}{R \cdot g} - \frac{c}{G} \right) + \frac{2h_G}{G} \left(1 - \frac{\mu}{1 + \mu} \cdot \frac{h_{GT}}{h_G} \right) \cdot \frac{\alpha_y}{g} + \frac{h_{BC}\rho \cdot u^2 \cdot S \cdot C_D}{m \cdot g \cdot G}$$

Dengan kondisi,

- a. Nilai $D = 1$
- b. Faktor Angin diabaikan, $\left(\frac{h_{BC}\rho \cdot u^2 \cdot S \cdot C_D}{m \cdot g \cdot G} = 0 \right)$
- c. Superelevasi atau *cant nol*, karena tidak ada peninggian sepur, ($c = 0$)

2. Formula Kunieda

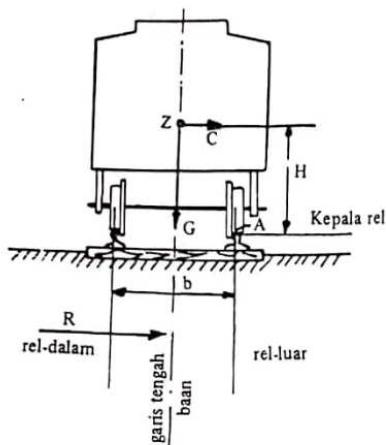
Formula Kunieda adalah formula yang telah disederhanakan, untuk menghitung risiko pada Overturn kereta, mempertimbangkan gaya sentrifugal pada lintasan lengkung, getaran kendaraan (terutama lateral) dan efek angin dari samping, yang diajukan oleh Dr. M. Kunieda. Ini adalah persamaan yang telah disederhanakan yang didasari mekanika statis, tetapi tidak mengabaikan fenomena di lapangan.

$$D = \frac{2h_G}{G} \left(\frac{v^2}{R \cdot g} - \frac{c}{G} \right) + \frac{2h_G}{G} \left(1 - \frac{\mu}{1 + \mu} \cdot \frac{h_{GT}}{h_G} \right) \cdot \frac{\alpha_y}{g} + \frac{h_{BC}\rho \cdot u^2 \cdot S \cdot C_D}{m \cdot g \cdot G}$$

Dimana $h_G (=1.25 hG)$ adalah nilai kompensasi ketinggian titik pusat gravitasi h_G kereta dengan mempertimbangkan distorsi pada pegas yang ada pada bogie.

G adalah lebar sepur, atau jarak antara dua titik kontak roda/rel, v adalah kecepatan melengkung, R radius lengkung, g adalah percepatan gravitasi, c superelevasi (cant). μ adalah rasio massa antara dua bogie dan bodi (termasuk massa penumpang), h_{GT} adalah tinggi titik pusat gravitasi bogie. α_y adalah percepatan getaran lateral kereta ($\alpha_y = 0.1 g$; $v \geq 80 \text{ km/h}$, $\alpha_y = 0.1 g \times v/80$; $v \leq 80 \text{ km/h}$).

3. Kontak antara roda dan rel (Formula Heuman)



Sumber: Subyanto (1982)

Gambar II. 1 Kereta lewat tikungan membelok kekiri

$$C = m \times \alpha_n = \frac{G \cdot V^2}{g \cdot R} \text{ kilogram}$$

Keterangan :

Z: titik berat kereta

G: berat kereta dalam Kg

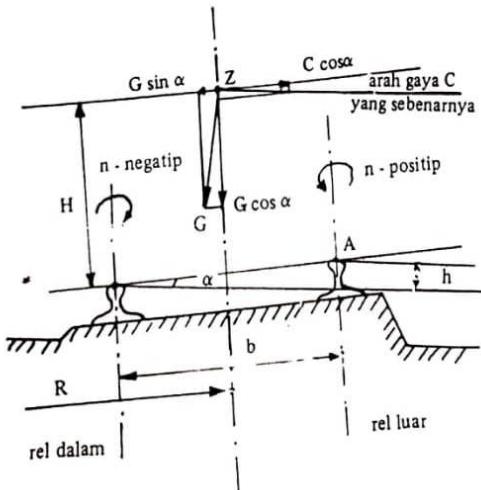
C: gaya sentrifugal dalam Kg

H: jarak titik berat kereta sampai pada kepala rel

B: lebar sepur

R: jari – jari lengkungan

m: massa kereta
 α_n : percepatan radial
 G: berat kereta
 V: kecepatan kereta
 g : gaya Tarik bumi



Sumber: Subyanto (1982)

Gambar II. 2 Gaya-gaya yang bekerja antara roda dan rel

Keterangan :

Z: titik berat kereta

G: berat kereta dalam Kg

C: gaya sentrifugal dalam Kg

H: jarak titik berat kereta sampai pada kepala rel

b: lebar sepur

R: jari – jari lengkungan

h: kemiringan

α : susut kemiringan

METODOLOGI

Dalam analisis data menggunakan data hasil survei inventarisasi Sarana dan Prasarana ditambah lagi dengan data-data sekunder sebagai pelengkap data primer.

1. Data Primer; jurnal yang terkait, data spesifikasi teknis lengkung, data spesifikasi teknis sarana, data perhitungan lengkung dari kontraktor
2. Data Sekunder; data tinjauan lapangan, data pengukuran lebar sepur, data keausan rel

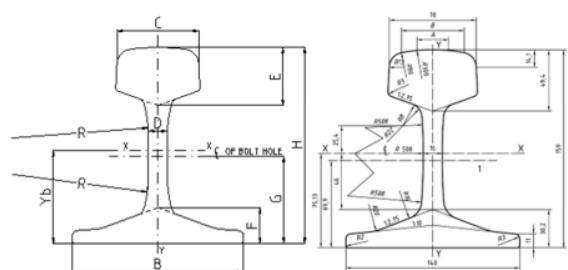
Dalam melakukan penelitian, penulis menggunakan beberapa metode untuk melengkapi data-data yang diperlukan. Metode tersebut adalah sebagai berikut:

1. Metode Observasi
2. Metode Literatur
3. Metode Survei Sampel
4. Metode Perhitungan

HASIL DAN ANALISIS

Spesifikasi Teknis

Profil dari rel yang digunakan di LRT Jakarta, jenis material yang dipakai adalah EN 13674-1 dan tipe rel 54E1. Rel yang digunakan, memiliki luas permukaan kontak 69,77 meter persegi, dengan tinggi kepala rel 159 meter. Memiliki massa 54,77 per meternya



Sumber: *Technical Specification (2017)*

Gambar IV. 1 Profil Rel LRT Jakarta

Dimana,

Yb : Jarak tepi bawah rel ke garis netral

I_x : Momen inersia terhadap sumbu X

Dimensi tambahan di kepala rel

A = 20.024 mm; B = 49.727 mm; 1 = Posisi penandaan

Kemiringan samping kepala rel = 1:20

Tinjauan Lapangan

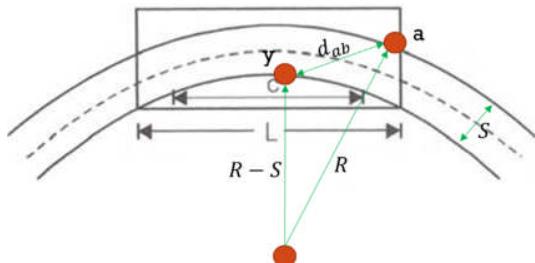


Gambar IV. 2 Gram besi roda dan rel yang aus

Terlihat adanya gram besi dari roda yang terkikis akibat adanya gesekan dengan rel, gram tersebut tersebar disepanjang tikungan tersebut. Akibatnya roda cepat aus dan sering dibubut, rel juga akan mengalami keausan. Pada kepala rel terdapat motif aus karena kontak antara roda dan rel, motif tersebut masih aman karena permukaan rel tidak terdapat gelombang, permukaan masih halus untuk dilewati roda.

Pada lengkung penuh terdapat gram besi, rel luar lebih banyak terdapat gram besi dari pada rel bagian dalam. Ketika kereta melalui lengkung tersebut dengan kecepatan diatas 10 km/j akan menghasilkan getaran yang lumayan besar. Saat ini kecepatan operasional kereta LRT Jakarta pada lengkung tersebut sudah dibatasi maksimal sampai 10 km/j dikarenakan laporan dari masinis dan roda cepat aus. Untuk itu pihak yang terkait membatasi kecepatan pada lengkungan tersebut.

Efek Jarak Gandar Terhadap Laju Kereta



Sumber: Subyanto (1982)

Gambar IV. 3 Literasi titik khayal wheelbase

Berikut ketentuan perhitungan yang akan didapatkan;

Wheelbase $< d_{ab}$ \rightarrow Kereta berjalan bebas

Wheelbase $> d_{ab}$ \rightarrow Kereta berjalan mepet (*Spiesgang*).

Tabel IV. 1 Perhitungan Jarak gandar dengan radius lengkung

Radius (m)	$d_{ab} = \sqrt{2Rs}$ (m)		Wheelbase (m)	Ket
63	1.00	<	2.13	Mepet
60	0.98	<	2.13	Mepet
66.9	1.03	<	2.13	Mepet
63.1	1.00	<	2.13	Mepet

Sumber: Hasil analisis

Dapat disimpulkan pada kasus LRT Jakarta, besar Wheel base adalah 2130 mm. Dengan mengambil lengkung terkecil pada mainline, R60. Maka didapati besar $d_{ab} < \text{Wheelbase}$ yang berarti kereta berjalan mepet yang biasa dikenal dengan istilah (*Spiesgang*).

Tabel IV. 2 Perhitungan Jarak gandar dengan radius lengkungan dengan adanya pelebaran

Radius (m)	$d_{ab} = \sqrt{2Rs}$ (m)		Wheelbase (m)	Ket
63	1.88	<	2.13	Mepet
60	1.83	<	2.13	Mepet
66.9	1.94	<	2.13	Mepet
63.1	1.88	<	2.13	Mepet

Sumber: Hasil analisis

Dan dengan mengambil asumsi bahwa pelebaran maksimum sesuai aturan Permenhub, 20 mm, akan

dilakukan. Maka didapati besar $d_{ab} < \text{Wheelbase}$. Dan kereta tetap berjalan secara mepet.

Perhitungan Batas Kecepatan

Tabel IV. 3 Batas kecepatan pada lengkung

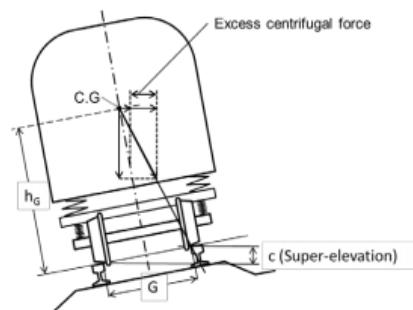
No.	Radius	Maximum Cant Deficiency	Vmax
1	63	71.74	19.50
2	60	75.32	19.50
3	66.9	67.55	19.50
4	63.1	71.62	19.50

Sumber: Hasil analisis

Maka batas kecepatan kereta di jalur lengkung dengan radius 60 m sebesar 20 km/jam, sedangkan yang diterapkan pada Taspat (pembatas kecepatan) sebesar 20 km/jam (dibulatkan). Setelah mengetahui batas kecepatan kereta yang diterapkan di jalur utama, selanjutnya dicari kecepatan kritis kereta untuk melihat kemungkinan apakah kecepatan kereta dapat dinaikkan atau tidak.

Perhitungan Kecepatan Kritis Kereta

Setelah mendapatkan batas kecepatan atau limit speed, selanjutnya mencari kecepatan kritis kereta menggunakan persamaan Kunieda sesuai jurnal dengan judul Analysis of Train-Overtake Derailments Caused by Excessive Curving Speed yang ditulis oleh Matsumoto, Michitsuji, dan Tanifuji. Diagram benda bebas gayanya seperti gambar di bawah ini.



Sumber: Iwnicki (2006)

Gambar IV. 4 Diagram Benda Bebas Persamaan Kunieda

Berdasarkan hasil perhitungan dengan beberapa kondisi di atas, maka kecepatan kritis kereta didapat sebesar 48 km per jam (pada lengkung yang paling pendek).

Tabel IV. 4 Batas kecepatan kritis kereta pada lengkung

No.	Radius	V _{kritis} (m/s)	V _{kritis} (km/h)
1	63	13.75	49.51
2	60	13.42	48.32
3	66.9	14.17	51.02
4	63.1	13.76	49.26

Sumber: Hasil analisis

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Kecepatan kritis kereta hasil perhitungan masih lebih tinggi, yaitu 48 km/jam atau terdapat selisih perbedaan sebesar 29 km/jam dengan batas kecepatan yang diterapkan.
2. Dari hasil survei yang telah dilakukan di lapangan pada lengkungan tersebut roda dan rel sudah terkikis (aus) dengan ditemukannya gram akibat gesekan antara roda dan rel dikarenakan kereta berjalan mepet (Spiezgang).
3. Berdasarkan hal tersebut diatas, batas kecepatan kereta masih bisa ditingkatkan hingga mencapai 25-27 km per jam secara teoritis tetapi kereta berjalan tidak mulus dan berjalan mepet.

Saran

1. Sebaiknya kecepatan kereta ditingkatkan menjadi maksimal 20 km/j kembali sesuai desain, karena kecepatan kereta yang rendah eksisting sekarang hanya maksimal 10 km/j berpotensi mengganggu jadwal operasi, terutama pada kondisi dimana perlu dilakukan penambahan kecepatan guna mencapai jeda waktu keberangkatan antar kereta (headway) yang telah ditentukan.

2. Sebagai upaya peningkatan kecepatan dan menghindari tergulingnya LRV sebaiknya pada lintasan lengkung dengan radius yang kecil dilakukan peninggian (cant) dan pelebaran sepur guna mengurangi keausan yang berlebihan pada roda. Serta perlu adanya perawatan khusus menggunakan lubrikasi pada titik tersebut untuk mengurangi gaya gesekan.
3. Perlu dilakukan pemeriksaan pada sambungan-sambungan (sekrup, las) terutama pada komponen yang terdapat di bogie ketika masa perawatan, karena hal ini dapat mempengaruhi penyebaran beban pada kedua roda.
4. Dalam menganalisa terutama untuk tujuan pengembangan, sebaiknya terdapat pembanding yang sama atau rujukan dari rancangan sebelumnya agar hasil yang didapat lebih akurat dan sesuai dengan keadaan nyata, dan memiliki sumber yang kuat.
5. Pada saat pengujian dilakukan sebaiknya menggunakan instrumen uji yang sesuai. Karena standar setiap pribadi berbeda-beda, dan hal ini dapat mengurangi ketelitian dan keakuratan data.

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 2017. Industrial Design Revision. A. Jakarta: Hyundai Rotem.
- _____. 2019. Milestone Detail LRT. Jakarta: PT. Jakarta Propertindo.
- _____. Lee, J. 2017. Weight Calculation. Jakarta: Hyundai Rotem.
- Nam, D. 2017. Technical Description of Bogie. Jakarta: Hyundai Rotem.
- _____. Republik Indonesia. 2007. Undang-Undang Nomor : 23 Tahun 2007 tentang Perkeretaapian. Jakarta: Menteri Perhubungan RI.
- _____. Republik Indonesia. 2012. Peraturan Menteri Perhubungan No.60 tahun 2012 tentang persyaratan teknis Jalur Kereta Api. Jakarta : Menteri Perhubungan RI.

____Safaria, F. 2017. Technical Specification
Cant Data Book. Jakarta: PT Wijaya Karya
(Persero), Tbk.

Esveld, C .2001. Modern Railway Track. Delft
University of Technology, Netherlands : MRT-
Production.

Iwnicki, S. 2006. Handbook of Railway Vehicle
Dynamics. Boca Raton, Florida, United States of
America: CRC Press Taylor & Francis Group.
Diambil kembali dari
<http://www.taylorandfrancis.com>

Subyanto. 1977. Dinamika Kendaraan Rel Bagian
Ke I. Bandung : PJKA.

Subyanto. 1982. Dinamika Kendaraan Rel Bagian
Ke II. Bandung : C.V. Komala.

Tzanakakis, K. 2013. The Railway Track and Its
Long Term Behaviour. London : Springer.