

ANALISA *RESISTANCE*, *TRACTIVE EFFORT* DAN GAYA SENTRIFUGAL PADA KERETA API TAKSAKA DI TIKUNGAN KARANGGANDUL

Jean Mario Valentino*

*Perekayasa Pertama Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Gedung Teknologi II lantai 3, Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan

*Email : jean.mario@bppt.go.id

Abstrak

Penggunaan sarana transportasi kereta di atas rel yang terpisah dari interaksi moda angkutan darat lain memungkinkan kereta beroperasi dengan kecepatan tinggi. Namun, pengaturan kecepatan operasi kereta perlu dilakukan, mengingat gaya dan momen yang bekerja pada kereta beserta sifatnya, akan mempengaruhi stabilitas, keamanan dan kenyamanan kereta. Metode untuk mendapatkan kecepatan operasi yang aman dilakukan perhitungan dan analisa mengenai train resistance, tractive effort, gaya sentrifugal dan momen guling kereta dengan menggunakan data kereta api Taksaka yang berjalan dengan kecepatan 60 km/jam pada jalur Purwokerto – Bumiayu dimana terdapat lintasan lengkung dengan radius sebesar 300 m. Dari hasil analisa didapatkan grafik karakteristik Tractive Effort vs Resistance terlihat kecepatan optimal adalah pada kecepatan 70-80 km/jam. Dari grafik gaya sentrifugal didapatkan titik kritis terjadi pada kecepatan sekitar 90 km/jam, dengan peninggian rel setinggi 0,15 m maka kereta api Taksaka pada kecepatan maksimal 60 km/jam adalah aman (tidak terguling) dan layak untuk beroperasi di lintasan lengkung tersebut.

Kata kunci: *Train Resistance, Tractive Effort, gaya sentrifugal, momen guling*

1. PENDAHULUAN

Kereta api Taksaka adalah kereta api eksekutif yang dioperasikan oleh PT. KAI (persero) untuk melayani koridor Yogyakarta – Jakarta dan sebaliknya. Rute yang dilalui sepanjang 517 km dan ditempuh dalam waktu kurang lebih 7 jam. Rangkaian KA Taksaka terdiri atas 1 lokomotif seri CC 203 dan 8 kereta kelas eksekutif K1 dan memiliki kapasitas sebanyak 416 tempat duduk. Lokomotif CC 203 diproduksi oleh *General Electric Ltd.* Untuk kereta penumpang, Kereta api Taksaka menggunakan kereta K1 buatan PT. INKA Madiun.

1.1. Data Spesifikasi Kereta Api Taksaka

Pada Tabel 1. berikut merupakan spesifikasi kereta api Taksaka yang akan dianalisa melalui perhitungan matematis:

Tabel 1. Spesifikasi Kereta Api Taksaka

Properties	Jumlah	Satuan
Axle Load lokomotif CC 203 (6 axle)	14	ton
Berat lokomotif CC 203 (ready)	84	ton
Berat kereta K1 (kosong)	36	ton
Jumlah pnp per set (penuh)	416	pnp
Berat pnp per set (+ - 70 kg/pnp)	29,12	ton
Berat pnp per kereta K1	3,64	ton
Berat kereta K1 (isi)	39,64	ton
Jumlah kereta per set	8	kereta
Berat kereta restorasi & pembangkit	72	ton
Berat kereta keseluruhan 1 set	473,12	ton
Panjang lokomotif	15214	mm
Panjang kereta K1	20920	mm

Panjang kereta api per set	182574 mm
Tinggi kereta	3637 mm
Daya Lokomotif	2000 hp

Sumber: Hartono AS

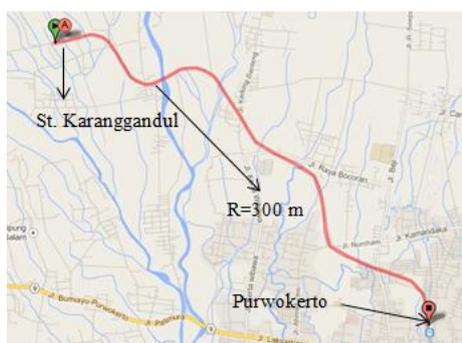
1.2. Data Jalur Rel Purwokerto – Karanggandul

Data jalan rel yang digunakan pada penelitian ini adalah pada lintas Jalur Selatan Jawa, sebagai sampel penelitian diambil lintas Purwokerto – Karanggandul. Lintas ini menghubungkan stasiun Purwokerto dengan stasiun Karanggandul yang berjarak 6,86 km. Pada area sekitar stasiun Karanggandul, terdapat lintasan lengkung dengan radius 300 m. Alasan pemilihan lintasan ini adalah pernah terjadi kecelakaan kereta pengangkut BBM anjlok menjelang emplasemen Karanggandul Purwokerto (dari arah Stasiun Purwokerto) pada tanggal 10 Juli 2005 di lokasi tersebut (REPORT KNKT/KA.05.08/05.05.020). Berikut adalah tabel dan gambaran kondisi jalan rel di Karanggandul:

Tabel 2. Data Jalan Rel

Data Jalan Rel	
Jenis Rel	R 42
Bantalan	Kayu
Lengkungan / Radius	300 m
Penambat	Pandrol Clip
Ballast	Kricak Penuh
Kelandaian	10,7 ‰

sumber : Report KNKT/KA.05.08/05.05.020



Gambar 1. Lokasi Lengkung Menjelang Emplasemen Karanggandul

Sumber: google map

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan perhitungan analitis *resistance*, *tractive effort*, gaya sentrifugal, momen guling, momen stabilisator dan *superelevation* dengan input data dari tabel 1 dan input variasi kecepatan mulai dari 0 km/jam (berhenti) sampai dengan 120 km/jam hingga didapatkan grafik *tractive effort* dan grafik gaya sentrifugal dan momen guling.

2.1. Resistance

Resistance atau hambatan pada kereta api adalah kombinasi gaya yang bekerja melawan gerakan kereta api. Hambatan yang paling diperhitungkan pada umumnya yaitu *Rolling resistance* (R_r), *Gradient resistance* (R_g) dan *Curvature resistance* (R_c), sehingga hambatan total dalam kereta api atau *Total Train Resistance* (R_t) adalah:

$$R_t = R_r + R_g + R_c \quad (\text{kg/ton}) \quad (1)$$

2.1.1. Rolling Resistance

Rolling Resistance atau hambatan gelinding adalah hambatan yang terjadi antara roda kereta dengan permukaan rel. Secara empiris, hambatan gelinding dan hambatan udara pada kereta Taksaka dapat dihitung melalui persamaan *W.J. Davis* sebagai berikut:

$$R(r + air) = 0,6 + \frac{13}{w} + AV + \frac{BCV^2}{nw} \quad (2)$$

dimana,

$R(r + air)$ = resistance due to rolling and air

$0,6 + \frac{13}{w}$ = resistance due to rolling, track and axle

AV = Flange resistance

$\frac{BCV^2}{nw}$ = air resistance

w = weight of axle (ton)

n = number of axles

V = speed (km/hour)

Untuk $R(r + air)$ Lokomotif CC 203 Parameter data empiris *Davis Equation* yang digunakan pada yaitu:

$A = 0,0085$ (for trains and passenger)

$B = 0,0045$ (relative)

$C = 11,20$ (for train of 100 ton weight and more)

Untuk $R(r + air)$ kereta K1 eksekutif, maka parameter data empiris *Davis equation* yang digunakan yaitu:

$A = 0,0085$ (for trains and passenger)

$B = 0,0007$ (for passenger)

$C = 9,75$ (for train of 50 ton weight)

2.1.2 Curve Resistance

Curve Resistance atau hambatan pada lengkungan pada rel terjadi pada waktu kereta api melalui jalan rel tikungan atau lengkungan, dan ditambah pula gesekan antara roda dengan rel karena roda dipaksa berbelok oleh rel. Hambatan pada lengkungan dinyatakan sebagai berikut:

$$WK = wK \times G \text{ (kg)} \quad (3)$$

dimana,

G = berat lokomotif ditambah berat rangkaian (ton)

wK = hambatan tikungan spesifik (kg/ton), yang didapat dari:

$$wK = \frac{400}{R-20} \text{ kg/ton} \quad (4)$$

2.1.3. Gradient Resistance

Gradient resistance adalah hambatan ketika kereta melalui jalan yang menanjak, sehingga gaya tarik pada lokomotif akan digunakan untuk melawan gaya gravitasi.

$$\sin \alpha = \frac{BC}{AB} = BC\%_{00} \quad (5)$$

Maka *gradient resistance* adalah kelandaian (%) \times berat kereta, Kelandaian yang digunakan pada penelitian ini adalah pada kelandaian pada sekitar emplasemen Stasiun Karanggandul, yaitu 10,7 ‰.

2.1.5. Total Train Resistance

Total train resistance adalah hambatan total yang terjadi pada kereta saat berjalan yang didapatkan dari penjumlahan *resistance* yang ada. *Total train resistance* yang terjadi menggunakan persamaan (1) diatas, Sehingga didapatkan *Train Resistance* (Rt) dengan variasi kecepatan 0 km/h (berhenti) sampai dengan kecepatan maksimum 120 km/h.

2.2. Analisa Tractive Effort

Tractive force atau *tractive effort* (Te) adalah gaya tarik yang dibangkitkan oleh lokomotif untuk menggerakkan kereta atau jumlah gaya pada roda yang tersedia untuk menggerakkan kereta. Gaya ini terjadi apabila ada beban pada kendaraan dan koefisien gesek antara roda dengan jalan rel. *Tractive force* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Te = \frac{270 \times \text{power (hp)}}{v} \quad (6)$$

Persamaan (6) diatas menggambarkan kondisi *tractive force* ideal. Akan tetapi daya yang diteruskan dari motor ke roda penggerak melalui transmisi elektrik maupun hidrolis pasti terjadi rugi-rugi, maka perlu digunakan faktor efisiensi (η). Apabila ditambahkan faktor efisiensi sebesar 80-85%, maka *tractive effort* dapat diketahui dan dapat dibandingkan dengan *total resistance* pada setiap variasi kecepatan.

Ketika lokomotif mulai bergerak untuk menarik rangkaian kereta, momen putar pada roda penggerak yang akan menghasilkan *tractive force* dibatasi oleh gaya gesek antara roda dengan rel, bukan oleh daya lokomotif. Koefisien ini disebut sebagai koefisien adhesi, dan gaya tarik yang dihasilkan disebut gaya tarik adhesi. Besarnya gaya tarik adhesi dapat dihitung sebagai berikut:

$$F_a = f \times N = \mu \times N \tag{7}$$

dimana,

F_a = gaya tarik adhesi

$f = \mu$ = koefisien adhesi

N = berat adhesi

Untuk *dry rail*: $\mu = \frac{7,5}{v+44} + 0,161$

Untuk *wet rail*: $\mu = \frac{7,5}{v+44} + 0,109$ (8)

Saat kondisi *wet rail*, maka koefisien adhesi lebih rendah daripada kondisi *dry rail*. Untuk menghindari lokomotif selip pada waktu start atau melalui tanjakan, sering diambil $f=0,19$ atau 19 % sebagai dasar perhitungan, atau dapat pula menggunakan dasar perhitungan pada tabel 3 dibawah:

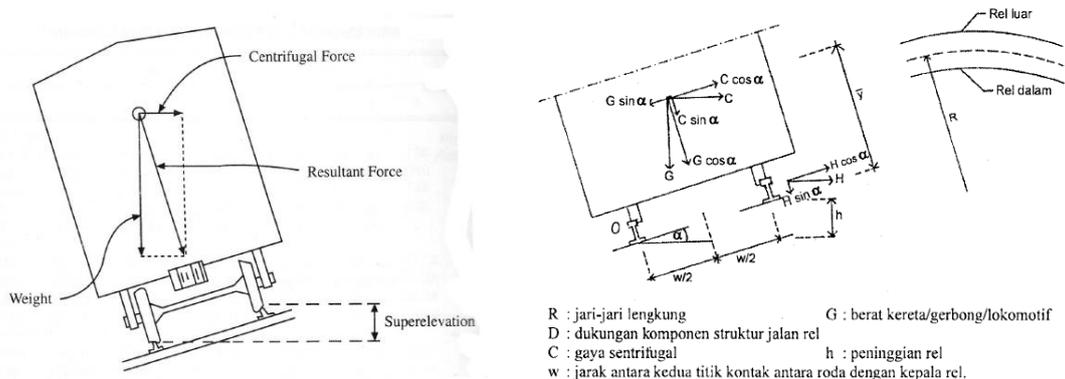
Tabel 3. Koefisien Adhesi Vs Kondisi Permukaan Jalan

		Surface Conditions						
		Dry		Wet		Snow/Ice		
		Speed (kph)	10	80	10	80	10	80
Modes	Highway	MAX	0.8	0.72	0.6	0.45	0.2	0.05
		MIN	0.66	0.52	0.42	0.27	0.36	0.18
	Rail	MAX	0.35	0.29	0.25	0.17	-	-
		MIN	0.27	0.15	0.19	0.1	-	-

Sumber : Iwnicky

2.3. Gaya Sentrifugal

Pada saat kereta bergerak dalam lintasan melengkung dengan radius putar tertentu, terdapat salah satu gaya yang bekerja pada kereta berupa gaya sentrifugal. Berikut merupakan skema sederhana yang menggambarkan gaya sentrifugal yang bekerja pada kereta.



Gambar 2. Skema Kondisi Kereta pada Lintasan Melingkar

Sumber: Suryo Hapsoro

Untuk analisa pada kondisi ini dihitung melalui persamaan sebagai berikut.

$$C = \frac{mv^2}{R} \tag{9}$$

$$G = m.g \tag{10}$$

2.4. Momen Guling

Gaya sentrifugal bekerja pada titik berat (*Center of Gravity*) dari kereta api, dan arahnya menuju keluar lengkungan meninggalkan titik pusat. Apabila tinggi titik berat kereta yang diukur dari rel adalah sebesar z , maka berlaku momen penggulingan:

$$MG = C \times z \tag{11}$$

dimana,

MG = Momen Guling (N)

z = tinggi titik berat (m)

2.5. Momen Stabilisator

Momen stabilisator berfungsi untuk meniadakan atau menetralsir momen guling, dengan syarat momen stabilisator ini harus lebih besar dan arahnya berlawanan dari momen guling:

$$MS = G \times \frac{b}{2} \tag{12}$$

dimana,

MS = Momen Stabilisator (N)

b = lebar gauge (m), di Indonesia 1,067 m

Ada tiga kemungkinan yang bisa terjadi, yaitu:

1. $MG < MS$: Kereta tidak terguling
2. $MG > MS$: Kereta pasti terguling
3. $MG = MS$: Titik kritis, dimana tercapai saat akan terjadi penggulingan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisa Tractive Effort

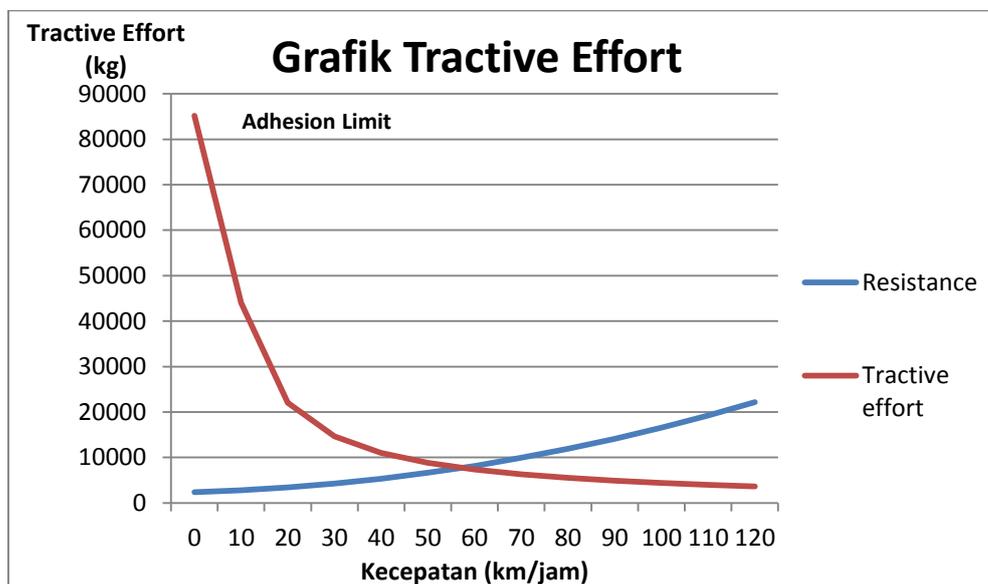
Dengan asumsi kondisi *wet rail* untuk kereta api Taksaka yang melintas pada jalur Purwokerto – Karanggandul maka apabila menggunakan persamaan (7) dan (8) akan didapatkan gaya tarik adhesi sebesar 85161 kg. Gaya tarik adhesi ini nantinya akan menjadi batas atas dari grafik *tractive effort* (gambar 3). Dari grafik tersebut, terlihat bahwa pada kecepatan 0 km/jam (diam), *tractive effort* dibatasi oleh *adhesion limit*. Ketika kereta mulai berjalan, kurva *tractive effort* akan semakin kecil dan kurva *resistance* akan semakin besar, sehingga akan terjadi titik temu antara kurva tersebut. Titik temu tersebut adalah kecepatan optimal dari kereta api. Dari grafik terlihat kecepatan optimum pada 60-70 km/jam.

Bila *total resistance* lebih kecil daripada *tractive force*, maka kereta akan mengalami percepatan. Apabila kereta dalam keadaan berhenti maka kereta dapat berjalan. Ketika *total resistance* yang terjadi sama dengan *tractive force*, maka tidak terjadi percepatan, dalam hal ini apabila kereta sudah berjalan maka tidak terjadi percepatan, dan apabila kereta dalam keadaan berhenti maka kereta tidak kuat untuk berjalan. Sedangkan ketika *total resistance* lebih besar daripada *tractive force*, maka akan terjadi perlambatan atau deselerasi dan kereta kemudian akan berhenti.

Tabel 4. Tabel Resistance vs Tractive Effort dengan Variasi Kecepatan

Kecepatan (km/h)	R vehicle (kg/ton)	R Lokomotif (kg/ton)	R Gradient (kg/ton)	R Curve (kg/ton)	R Total (kg)	Tractive effort (kg)
0	2,55	0,26	5,06	1,43	2388,47	85161
10	2,66	0,86	5,06	1,43	2777,6	44000
20	2,84	1,83	5,06	1,43	3395,63	22000
30	3,09	3,15	5,06	1,43	4242,56	14667
40	3,4	4,83	5,06	1,43	5318,39	11000
50	3,78	6,86	5,06	1,43	6623,12	8800
60	4,23	9,26	5,06	1,43	8156,75	7333
70	4,74	12,01	5,06	1,43	9919,28	6286
80	5,32	15,11	5,06	1,43	11910,71	5500
90	5,97	18,58	5,06	1,43	14131,04	4889

100	6,68	22,4	5,06	1,43	16580,27	4400
110	7,46	26,58	5,06	1,43	19258,4	4000
120	8,31	31,11	5,06	1,43	22165,43	3667



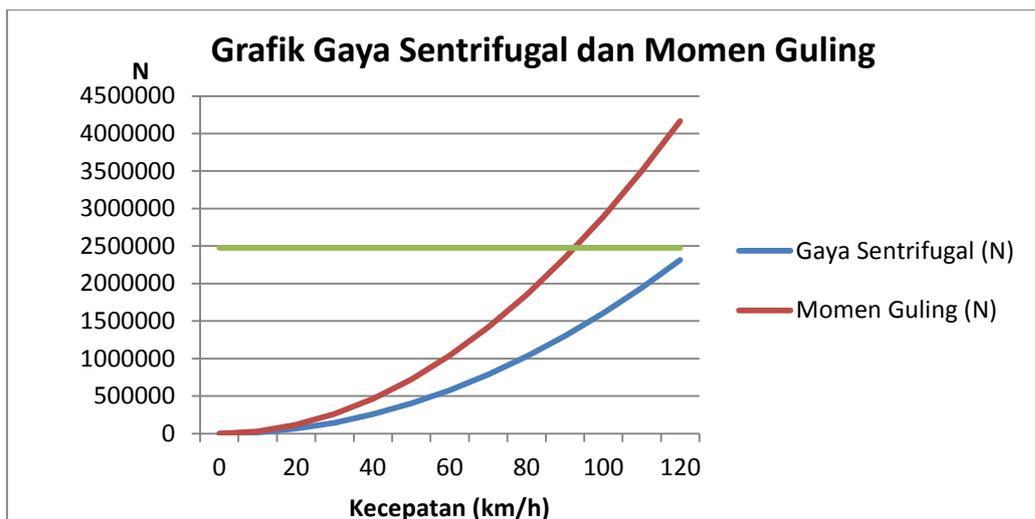
Gambar 3. Grafik *Tractive Effort* Kereta Api Taksaka

3.2. Analisa Gaya Sentrifugal dan Penggulingan pada Kereta

Tabel (5) menghitung gaya sentrifugal (menggunakan persamaan 9), momen guling (menggunakan persamaan 11) dan momen stabilisator (menggunakan persamaan 12) dengan variasi kecepatan dari 0 – 120 km/jam, dan menghasilkan grafik gaya sentrifugal dan momen guling (gambar 4). Dari grafik tersebut terlihat bahwa titik kritis terjadi pada kecepatan sekitar 90 km/jam, sehingga apabila kereta dioperasikan melebihi 90 km/jam, maka kereta akan terguling.

Tabel 5. Tabel Gaya Sentrifugal dan Momen Guling

Kecepatan (km/h)	Gaya Sentrifugal (N)	Momen Guling (N)	Momen Stabilisator (N)
0	0	0	2476137,39
10	16076,11	28937	2476137,39
20	64304,45	115748,01	2476137,39
30	144685,02	260433,03	2476137,39
40	257217,8	462992,05	2476137,39
50	401902,82	723425,08	2476137,39
60	578740,06	1041732,11	2476137,39
70	787729,53	1417913,15	2476137,39
80	1028871,22	1851968,2	2476137,39
90	1302165,14	2343897,25	2476137,39
100	1607611,28	2893700,31	2476137,39
110	1945209,65	3501377,37	2476137,39
120	2314960,24	4166928,44	2476137,39



Gambar 4. Grafik Gaya Sentrifugal dan Momen Guling

3.3. Peninggian Rel (*Superelevation*)

Dengan adanya “momen aksi” (gaya sentrifugal), maka muncul “momen reaksi” yang disebabkan oleh beratnya kereta itu sendiri. “Momen reaksi” ini bekerja menahan kereta agar tidak terguling atau menstabilkan kereta. Pada titik kritis, akan terjadi momen penggulingan, yaitu ketika besarnya gaya sentrifugal (C) sama dengan gaya berat kereta (G). Untuk mencegah terjadinya penggulingan, salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan peninggian rel. Dari gambar (2) berlaku hubungan:

$$G \sin \alpha = C \cos \alpha \tag{13}$$

Substitusi persamaan (9)

$$G \sin \alpha = \frac{mv^2}{R} \cos \alpha$$

Substitusi persamaan (10)

$$G \sin \alpha = \frac{Gv^2}{gR} \cos \alpha$$

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{gR}$$

$$\tan \alpha = \frac{h}{w}$$

Sehingga,

$$h = \frac{wv^2}{gR} \tag{14}$$

Melalui persamaan (14), apabila kecepatan rancangan pada radius 300 m adalah 60 km/jam, maka peninggian rel yang dilakukan untuk mengimbangi gaya sentrifugal adalah sebesar 0,15 m.

4. KESIMPULAN

Pada kajian ini dilakukan analisa pada kereta api Taksaka, jurusan Jogjakarta – Jakarta, diambil sampel lintasan Purwokerto – Karangandul yang memiliki panjang 6,86 km, terdapat lengkungan dengan radius 300 m dan memiliki gradien atau kelandaian sebesar 10,7‰. Analisa pertama adalah mengenai *resistance* pada lokomotif CC 203 dan kereta K1 (*rolling resistance*), hambatan gradien (*gradient resistance*) dan hambatan lengkung (*curvature resistance*) yang terjadi pada kereta Taksaka. Dari hasil perhitungan *resistance* tersebut, maka dapat dihubungkan dengan analisa mengenai *tractive force* dan *adhesion limit*, maka akan didapatkan grafik karakteristik *Tractive Effort vs Resistance*. Dari grafik tersebut, terlihat kecepatan optimal adalah pada kecepatan 70-80 km/jam.

Analisa kedua adalah mengenai gaya sentrifugal, momen guling dan momen stabilisator. Dari grafik gaya sentrifugal tersebut terlihat bahwa titik kritis terjadi pada kecepatan sekitar 90 km/jam, sehingga apabila kereta dioperasikan melebihi 90 km/jam, maka kereta akan terguling. Salah satu cara untuk mengatasi momen guling adalah peninggian rel. Dari hasil perhitungan menyatakan

bahwa kereta Taksaka ketika melewati lengkungan 300 m dengan peninggian rel setinggi 0,15 m pada kecepatan 60 km/jam adalah aman (tidak terguling) dan masih aman dan layak untuk beroperasi.

DAFTAR PUSTAKA

Hartono AS, *Lokomotif dan Kereta Api Diesel di Indonesia edisi 3*, Ilalang Sakti Komunikasi Depok, Juli 2012

Iwnicky, Simon. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, Taylor&Francis Group, 2006

REPORT KNKT/KA.05.08/05.05.020, *PLH Anjlok KA 1365 KKW di Km 344+3/4 petak jalan antara Stasiun Purwokerto - Stasiun Karangandul, Jawa Tengah*, Tanggal 10 Juli 2005

Subyanto, *Dinamika Kendaraan Rel Bagian I*, Bandung. 1977

Tri Utomo, Suryo Hapsoro. *Jalan Rel*. Beta Offset Yogyakarta. Juni 2009