



Pemodelan dan Simulasi Dinamik Kereta *Tilting* pada Lintas Kereta Api Jakarta – Bandung

Eki Dwi Juliansyah Putra¹, Yunendar Aryo Handoko², Indria Herman³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. E ITB, Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

¹ekijp@students.itb.ac.id, ²yunendar@ftmd.itb.ac.id, ³indria.herman@ftmd.itb.ac.id

**Corresponding Author*

Tanggal Diterima: 25 Januari 2022, Tanggal Direvisi: 21 Juni 2022, Tanggal Disetujui: 23 Juni 2022

ABSTRACT

Tilting Train Dynamic Modeling and Simulation on Jakarta – Bandung Railway : Train is a mode of mass transportation that connects Jakarta to Bandung or vice versa with a travel time of three and a half hours. If trains pass many curves on the railway, they need to reduce their speed to avoid excessive lateral acceleration. In the curves, cant is given to overcome this, but its magnitude is limited by the regulations. Tilting train can be a solution to overcome the limitation by tilting the carbody. In this research, tilting train is modeled using Universal Mechanism software. The tilting system is modeled by an actuator as a joint which its length is a function of time. The model is validated by comparing the value of the analytical parameter based on the theory with the value of the simulation results. Furthermore, the dynamic simulations using the validated model is carried out to test the tilting system in several curve geometry scenarios. Based on the simulation results, the tilting system works well in reducing the carbody lateral acceleration, but is not optimal because it is not equipped yet with a control system. The plan to increase the speed of the train on the Jakarta – Bandung railway to reduce travel time was prepared analytically and tested by the simulations for several curves. Ignoring track irregularities, the tilting train is planned to operate with an average speed of 112 km/h so that the Jakarta – Bandung railway can be reached in less than two hours.

Keywords: Tilting Train, Speed, Lateral Acceleration, The Jakarta – Bandung Railway.

ABSTRAK

Kereta api menjadi moda transportasi massal yang menghubungkan pergerakan masyarakat dari Jakarta menuju Bandung ataupun sebaliknya dengan waktu tempuh selama tiga setengah jam. Dengan jalan rel yang memiliki banyak tikungan, kereta perlu mengurangi kecepatannya supaya tidak mengalami percepatan lateral yang sangat besar. Pada tikungan diberi cant untuk mengatasi hal tersebut, namun besarnya dibatasi oleh regulasi. Kereta tilting dapat menjadi solusi untuk mengatasi keterbatasan tersebut dengan cara memiringkan badan kereta ketika melewati tikungan. Pada penelitian ini, kereta tilting dimodelkan menggunakan perangkat lunak Universal Mechanism. Sistem tilting dimodelkan melalui aktuator tilting sebagai sambungan yang panjangnya merupakan fungsi terhadap waktu. Model divalidasi dengan membandingkan nilai analitik parameter berdasar teori dengan nilai hasil simulasi. Selanjutnya simulasi dinamik dengan menggunakan model yang telah divalidasi dilakukan untuk menguji sistem tilting pada beberapa skenario geometri tikungan. Berdasarkan hasil simulasi sistem tilting bekerja dengan baik dalam mengurangi percepatan lateral badan kereta, namun belum optimal karena belum dilengkapi dengan sistem kontrol. Rencana peningkatan kecepatan kereta di lintas KA Jakarta – Bandung untuk memangkas waktu tempuh disusun secara analitik dan diuji dengan simulasi untuk beberapa tikungan. Dengan mengabaikan ketidakaturan rel, kereta tilting direncanakan dapat beroperasi dengan kecepatan rata-rata 112 km/jam sehingga lintas KA Jakarta – Bandung dapat ditempuh selama kurang dari dua jam.

Kata Kunci: Kereta Tilting, Kecepatan, Percepatan Lateral, Lintas KA Jakarta – Bandung.

I. Pendahuluan

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi massal yang digunakan oleh sebagian masyarakat di Indonesia. Jumlah penumpang kereta api dari tahun 2006 hingga 2019 cenderung

meningkat setiap tahunnya (Badan Pusat Statistik, 2020). Kereta api dapat membawa penumpang lebih banyak dibandingkan dengan moda transportasi massal lainnya dalam sekali perjalanan. Selain itu, alat transportasi ini

memiliki jalur sendiri sehingga dapat terhindar dari kemacetan lalu lintas. Dengan keunggulan tersebut, tidak dapat dipungkiri kereta api menjadi pilihan yang diambil oleh sebagian masyarakat untuk menempuh perjalanan yang jauh.

Jakarta dan Bandung sebagai dua kota besar di Indonesia, kereta api dapat menjadi salah satu pilihan moda transportasi bagi masyarakat yang ingin bepergian dari Jakarta menuju Bandung ataupun sebaliknya. Saat ini, waktu yang diperlukan kereta dalam melakukan perjalanan dari Jakarta ke Bandung termasuk waktu untuk berhenti di beberapa stasiun rata-rata selama tiga setengah jam (ANTARA, 2019). Jalur yang dilalui kereta ketika memasuki Purwakarta sampai di Bandung melalui pegunungan. Hal ini menyebabkan terdapat banyaknya tikungan pada jalan rel di lintas tersebut (PT. KAI, 2017). Ketika melewati tikungan, kereta perlu mengurangi kecepatannya supaya tidak mengalami percepatan lateral yang sangat besar. Nilai percepatan lateral yang sangat besar dapat menyebabkan beberapa masalah. Dari sisi kereta, percepatan lateral yang besar dapat menyebabkan antara lain meningkatnya gaya lateral kontak roda dengan rel sehingga dapat menyebabkan kereta mengalami peristiwa keluar rel (derailment). Sementara dari sisi penumpang, nilai percepatan lateral berpengaruh terhadap tingkat ketidaknyamanan yang dirasakan oleh penumpang (Rochat, 2007).

Efek percepatan lateral yang dialami kereta dan penumpangnya perlu dikurangi untuk meningkatkan keamanan terhadap peristiwa keluar rel dan meningkatkan kenyamanan penumpang. Salah satu cara mengurangi nilai percepatan lateral adalah dengan membuat cant, yaitu membuat rel luar lebih tinggi dari rel dalam pada tikungan (Shabana, 2008). Peninggian rel luar ini memiliki batasan yang diatur melalui regulasi. Di Indonesia, batasan tersebut diatur di dalam Peraturan Menteri Perhubungan nomor 60 tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api. Pembatasan pada peninggian rel luar membuat kereta tetap perlu mengurangi kecepatan di tikungan dibandingkan ketika melaju di lintasan lurus. Beberapa negara sudah menerapkan suatu sistem yang dapat membantu kereta untuk melaju dengan kecepatan yang lebih tinggi ketika melewati tikungan, yaitu sistem tilting. Sistem tilting merupakan sistem yang dipasang pada kereta sehingga badan kereta dapat dibuat miring dengan sudut tertentu terhadap jalan rel ketika melewati tikungan (Rochat, 2007).

Sistem perkeretaapian di Indonesia belum menerapkan sistem tilting untuk menunjang kereta ketika melalui tikungan. Padahal Indonesia

memiliki banyak pegunungan sehingga memungkinkan lebih banyak tikungan pada jalan relnya. Dengan kondisi tersebut, sistem tilting dapat menjadi solusi dalam mengurangi waktu tempuh kereta (Kim, et al, 2011) yang melaju di lintasan yang memiliki banyak tikungan. Hal tersebut mendorong diperlukannya studi awal terkait kereta tilting sebelum diterapkan di Indonesia.

Berdasarkan identifikasi masalah yang disebutkan di atas, tujuan penelitian ini adalah untuk memodelkan kereta tilting, memvalidasi model, dan melakukan simulasi dinamik dengan menggunakan perangkat lunak sistem benda jamak, serta menyusun rencana peningkatan kecepatan kereta di lintas KA Jakarta – Bandung untuk memangkas waktu tempuh. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu sebagai langkah awal dalam penggunaan kereta tilting sebagai kereta penumpang di Indonesia sehingga waktu tempuh pada lintas kereta api yang memiliki banyak tikungan dapat dipangkas.

II. Metodologi Penelitian

Secara umum, metodologi yang digunakan pada penelitian ditunjukkan melalui **Gambar 1**.

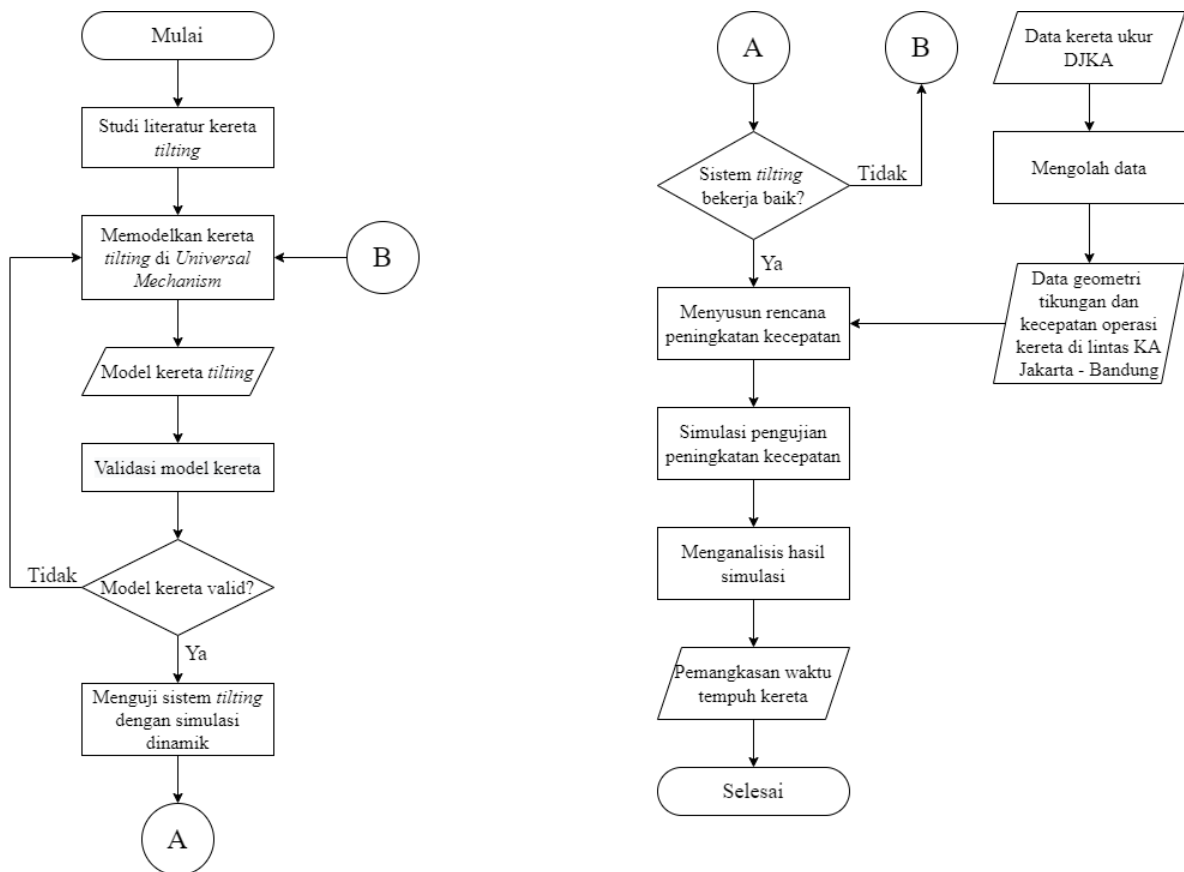
A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pusat Pengembangan Teknologi dan Industri Perkeretaapian (PPTI-KA), Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung. Lintas jalan rel yang ditinjau adalah lintas Jakarta – Bandung via Cikampek dan Purwakarta. Penelitian ini dilakukan pada Desember 2020 sampai dengan September 2021.

B. Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa data geometri tikungan dan kecepatan operasi kereta saat ini pada lintas Cikampek – Bandung yang berasal dari data kereta ukur milik DJKA. Data yang tersedia terbagi atas beberapa lintas, yaitu lintas Cikampek – Rendeh, lintas Rendeh – Cilame, lintas Cilame – Padalarang, dan lintas Padalarang – Bandung. Untuk lintas Jakarta – Cikampek, digunakan asumsi bahwa lintas cukup lurus dengan radius tikungan besar. **Tabel 1** menunjukkan panjang setiap lintas tersebut yang diperoleh dari perhitungan jarak antar-stasiun.

Berdasarkan data kereta ukur DJKA, dihitung panjang tikungan yang ada pada setiap lintas. Pada lintas Cikampek – Rendeh terdapat 9 tikungan dengan radius 150 m – 600 m, sementara pada lintas Rendeh – Cilame terdapat 35 tikungan dengan radius tersebut. Terdapat dua lengkung S



Gambar 1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

Tabel 1 Panjang Lintas Jakarta – Bandung

Lintas	Panjang Lintas	Satuan
Jakarta (Gambir) – Cikampek	75,467	km
Cikampek – Rendeh	54,939	km
Rendeh – Cilame	15,821	km
Cilame – Padalarang	7,305	km
Padalarang – Bandung	14,662	km

Sumber: ArcGIS Online, 2021

di antara 35 tikungan yang berada di lintas Rendeh – Cilame Untuk lintas Cilame – Padalarang dan Padalarang – Bandung hanya memiliki tikungan dengan radius lebih besar dari 600 m. Panjang total tikungan setiap lintas dapat dilihat pada Tabel 2. Panjang tersebut dihitung dengan menjumlahkan panjang lengkung setiap tikungan.

C. Pengolahan dan Analisis Data

Kereta tilting dimodelkan sebagai suatu sistem benda jamak. Model yang telah dibangun divalidasi untuk melihat kesesuaiannya dengan karakteristik kereta sebenarnya. Setelahnya, pengujian melalui berbagai simulasi dinamik dilakukan untuk melihat kerja sistem tilting yang ada di dalam model. Jika sistem tilting bekerja dengan baik, tahap berikutnya adalah menyusun rencana peningkatan kecepatan di lintas KA

Jakarta – Bandung. Simulasi terhadap rencana tersebut dilakukan untuk beberapa skenario geometri tikungan. Keseluruhan tahap pemodelan dan simulasi dilakukan di dalam perangkat lunak Universal Mechanism.

1. Pemodelan Kereta Tilting

Pemodelan kereta tilting dilakukan menggunakan perangkat lunak Universal Mechanism (UM). Sebagai sistem benda jamak, kereta tilting terdiri atas beberapa subsistem yang hampir sama dengan kereta api pada umumnya, yaitu badan kereta, bogie (kerangka bogie dan bolster), dan perangkat roda. Pada model yang dibangun, badan kereta disangga dengan dua bogie dengan setiap bogie memiliki dua perangkat roda. Perangkat roda dihubungkan ke kerangka bogie melalui suspensi primer. Aktuator tilting diletakkan di

antara kerangka bogie dengan bolster untuk menghubungkan kedua subsistem tersebut. Kemudian bolster dengan badan kereta dihubungkan dengan suspensi sekunder. Susunan subsistem model kereta tilting ditunjukkan dengan Gambar 2.

Sistem tilting dibuat di dalam subsistem bogie. Sistem tilting terdiri atas aktuator tilting untuk memberikan kemiringan pada badan kereta dan bolster untuk menyalurkan kemiringan yang dihasilkan aktuator ke badan kereta. Sistem tilting yang dibuat merupakan tilting aktif sehingga menggunakan aktuator, namun belum menerapkan sistem kontrol di dalamnya. Aktuator dimodelkan sebagai sambungan (joint) jenis rod constraint yang panjangnya dapat berupa fungsi waktu.

Persamaan panjang aktuator perlu diturunkan terlebih dahulu untuk setiap segmentasi lintasan. Pengujian model kereta tilting akan berfokus pada lintasan berupa tikungan. Untuk tikungan sendiri terbagi menjadi beberapa segmentasi, yaitu lintasan lurus, lengkung peralihan sisi masuk, lengkung utama, lengkuh peralihan sisi keluar, dan lintasan lurus. Perubahan panjang aktuator diatur sedemikian rupa sehingga terjadi pada daerah lengkung peralihan, baik sisi masuk maupun keluar. Ilustrasi perubahan panjang aktuator ditunjukkan melalui **Gambar 3**.

Persamaan yang dibangun pada tabel fungsi waktu diatur untuk input sudut tilting positif akan memendekkan aktuator kanan dan memanjangkan aktuator kiri sehingga bolster berotasi dalam arah positif di sumbu x ketika berbelok ke kanan. Perubahan panjang aktuator dirumuskan berdasarkan **Gambar 3** di dalam Persamaan 1.

$$dL = \frac{y_3 \tan \varphi}{\Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

dengan dL adalah perubahan panjang aktuator (meter), y₃ adalah setengah jarak antar-aktuator (meter), φ adalah sudut tilting (derajat).

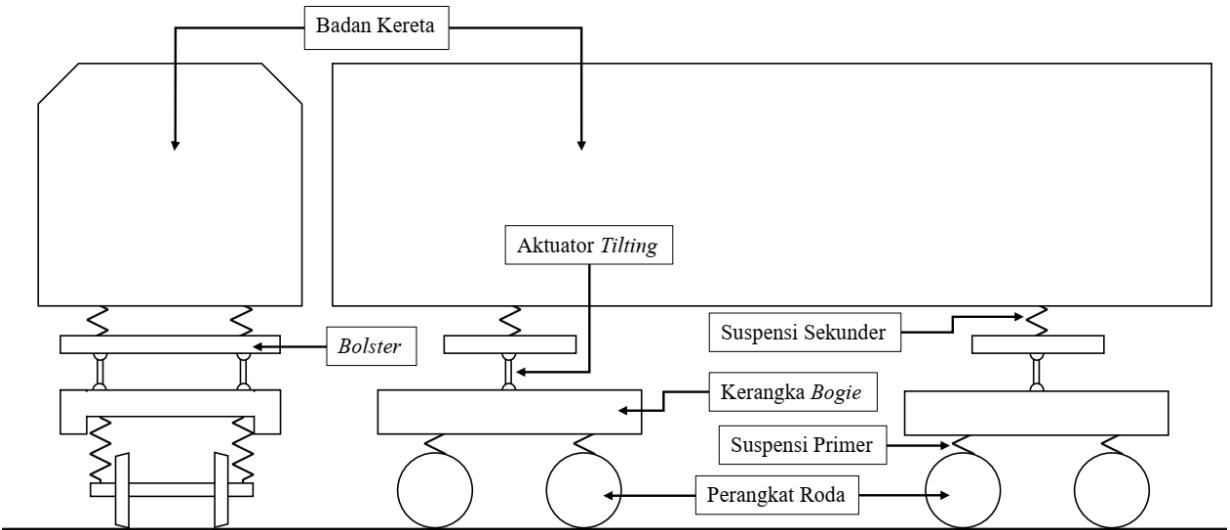
2. Validasi Model Kereta *Tilting*

Validasi model diperlukan untuk mengetahui kesesuaian model yang dibuat dengan kondisi sebenarnya. Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai gaya vertikal pada roda hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi pada kondisi statis, ketika kereta bergerak di lintasan lurus, dan ketika kereta bergerak di tikungan dengan kecepatan setimbang. Selain itu, validasi juga dilakukan dengan membandingkan frekuensi pribadi sistem hasil perhitungan analitik dan hasil simulasi.

Pada kondisi statis dan di lintasan lurus, berat total kereta terbagi sama besar ke setiap roda. Jika satu unit kereta memiliki empat buah perangkat roda

Tabel 2 Panjang Tikungan pada Lintas Jakarta – Bandung

Lintas	Panjang Tikungan	Satuan
Cikampek – Rendeh	32,343	km
Rendeh – Cilame	6,270	km
Cilame – Padalarang	0,893	km
Padalarang – Bandung	6,332	km



Gambar 2 Susunan Subsistem Kereta Tilting

atau delapan buah roda, setiap roda akan mendistribusikan gaya sebesar seperdelapan berat total kereta ke rel di bawahnya. Dengan demikian, gaya vertikal pada setiap roda dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$Q = \frac{1}{8} m_{\text{kereta}} g \dots\dots\dots (2)$$

dengan Q adalah gaya vertikal pada roda (N), m_{kereta} adalah massa total kereta (kg), dan g adalah percepatan gravitasi (m/s^2).

Secara analitik, nilai gaya vertikal pada roda saat melewati tikungan dapat dihitung dengan Persamaan 3 dan Persamaan 4. Baik roda dalam ataupun luar akan mengalami gaya vertikal yang sama besarnya ketika kereta bergerak dengan kecepatan setimbangnya di tikungan. Pada validasi ini, kereta dijalankan pada tikungan yang memiliki radius 1000 meter dan peninggian rel 50 mm dengan kecepatan 75 km/jam.

$$Q_i = \frac{W_0}{2} \left[2 - \gamma + \frac{V^2}{gR} \frac{h}{2b_0} - \frac{H_G^*}{b_0} \left(\frac{V^2}{gR} - \frac{h}{2b_0} \right) \right] \dots (3)$$

$$Q_o = \frac{W_0}{2} \left[\gamma + \frac{V^2}{gR} \frac{h}{2b_0} + \frac{H_G^*}{b_0} \left(\frac{V^2}{gR} - \frac{h}{2b_0} \right) \right] \dots\dots\dots (4)$$

dimana Q_i adalah gaya vertikal roda dalam (N), Q_o adalah gaya vertikal roda luar (N), W_0 adalah total gaya berat kereta dibagi dengan jumlah perangkat roda (N), γ adalah rasio gaya statik roda

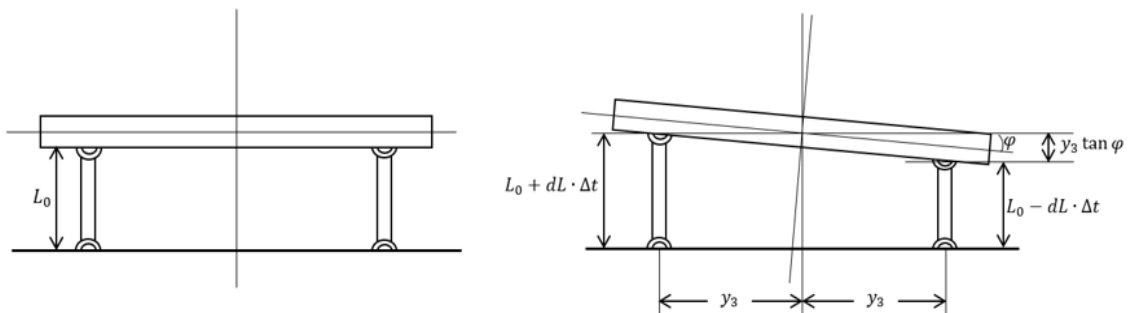
luar terhadap roda dalam, H_G^* adalah tinggi efektif pusat massa kereta (m), V adalah kecepatan kereta (m/s), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), R adalah radius tikungan (m), h adalah tinggi *cant* (m), dan $2b_0$ adalah jarak antar-titik kontak roda kereta – rel (m).

Validasi keempat yang dilakukan dengan membandingkan nilai frekuensi pribadi hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi. Perhitungan analitik dilakukan dengan memodelkan kereta sebagai sistem getaran dua derajat kebebasan. Sistem tersebut terdiri atas dua benda yaitu badan kereta dan *bogie* yang dihubungkan dengan pegas yang mewakili suspensi sekunder dan suspensi primer seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**.

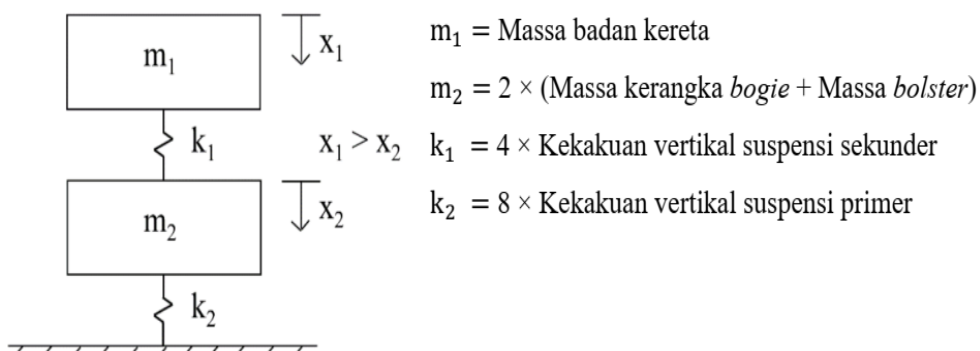
Berdasarkan **Gambar 4**, persamaan gerak masing-masing benda dapat diturunkan yang dapat dilihat pada literatur Wikaranadhi (2020) sehingga diperoleh persamaan akhir yaitu Persamaan 5.

$$m_1 m_2 \lambda^2 - (m_1 k_1 + m_1 k_2 + m_2 k_1) \lambda + k_1 k_2 = 0 \dots\dots\dots (5)$$

dengan $\lambda = \omega^2$. Persamaan 5 diselesaikan dengan solusi persamaan kuadrat dimana $m_1 = 32000$ kg, $m_2 = 5630$ kg, $k_1 = 1,72 \times 10^6$ N/m, dan $k_2 = 9,76 \times 10^6$ N/m.



Gambar 3 Ilustrasi Kondisi Nominal Aktuator dan Perubahan Panjang Aktuator



Gambar 4 Susunan Sistem Kereta Dua Derajat Kebebasan

3. Pengujian Model Kereta *Tilting*

Secara umum, pengujian dilakukan dengan menjalankan kereta pada lintasan yang memiliki tikungan. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem *tilting* yang telah dibuat bekerja dengan baik. Tahap simulasi pengujian yang dilakukan terdiri atas simulasi pengaruh penambahan *cant*, simulasi pengaruh *tilting* badan kereta, simulasi pengaruh koefisien fleksibilitas suspensi, simulasi keamanan terhadap peristiwa keluar rel, dan simulasi terhadap data dari dua literatur berbeda. Parameter utama yang diamati pada setiap simulasi yang dilakukan adalah percepatan lateral pada kerangka acuan badan kereta seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**. Batas maksimum percepatan lateral yang digunakan pada penelitian ini adalah $0,78 \text{ m/s}^2$ (Nishioka, *et al*, 1997) seperti yang diterapkan di Jepang dengan kondisi lebar sepur 1067 mm.

Percepatan lateral pada badan kereta disimbolkan dengan a_{yc} yang dirumuskan melalui **Persamaan 6**. Berdasarkan literatur Eki (2021), pendekatan sudut kecil digunakan untuk memudahkan penggunaan pada perangkat lunak *Universal Mechanism* sehingga menghasilkan **Persamaan 7**.

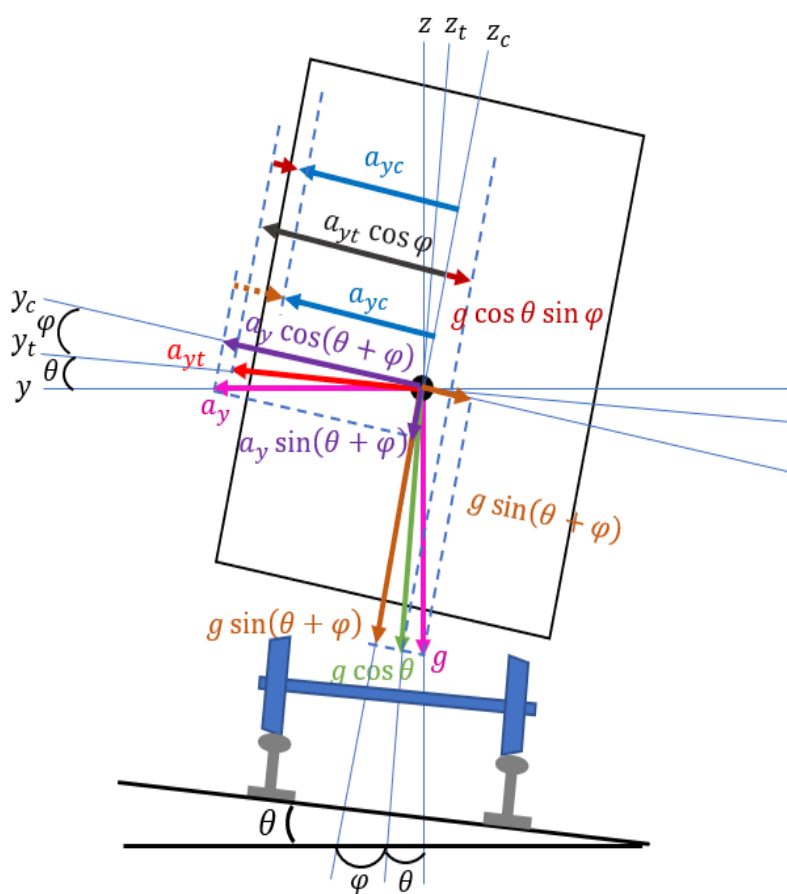
$$a_{yc} = a_y \cos(\theta + \varphi) - g \sin(\theta + \varphi) \dots\dots\dots(6)$$

$$a_{yc} \approx a_{yt} - g \sin \varphi \dots\dots\dots(7)$$

dengan a_{yc} adalah percepatan lateral pada kerangka acuan badan kereta (m/s^2), a_{yt} adalah percepatan lateral pada kerangka acuan lintasan (m/s^2), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), dan φ adalah sudut *tilting* (derajat).

Simulasi yang pertama dilakukan bertujuan untuk melihat pengaruh penambahan tinggi *cant* terhadap nilai percepatan lateral yang dialami kereta pada kerangka acuan badan kereta. Pada simulasi pengujian yang dilakukan, kereta dijalankan pada tikungan yang memiliki radius 600 meter tanpa ketidakaturan rel dengan kecepatan konstan 80 km/jam. *Cant* ideal untuk kondisi tersebut adalah setinggi 94 mm. Baik radius ataupun kecepatan dijaga konstan supaya pengaruh penambahan *cant* terhadap nilai percepatan lateral dapat diamati. Terdapat tujuh variasi tinggi *cant* yang diujikan, mulai dari 0 mm hingga 110 mm.

Pada pengujian kedua, kereta dijalankan pada lintasan tikungan yang memiliki radius pada lengkung utama 600 meter tanpa menerapkan



Gambar 5 Percepatan Lateral dan Vertikal Badan Kereta dengan Tilting di Tikungan

ketidakteraturan rel. Parameter yang divariasikan pada pengujian ini adalah kecepatan dan sudut tilting yang diberikan pada badan kereta. Sementara, parameter yang diamati adalah percepatan lateral pada kerangka acuan badan kereta dan sudut roll badan kereta pada kerangka acuan lintasan.

Pengujian ketiga dilakukan dengan memvariasikan koefisien fleksibilitas untuk melihat pengaruhnya terhadap percepatan lateral yang bekerja pada kereta dan sudut roll badan kereta. Berdasarkan literatur Zhang (2016), besar koefisien fleksibilitas secara perhitungan analitik dipengaruhi oleh beberapa parameter yang salah satunya adalah konstanta kekakuan batang anti-roll suspensi sekunder kereta. Variasi nilai kekakuan batang anti-roll yang digunakan adalah 0 Nm/rad, $9,4 \times 10^5$ Nm/rad (digunakan di model ini), dan $9,4 \times 10^9$ Nm/rad. Sementara secara simulasi, nilai koefisien fleksibilitas diperoleh dengan cara menjalankan kereta di lintasan tikungan yang memiliki radius sangat besar.

Dalam pengujian keempat, kriteria keamanan terhadap peristiwa keluar rel diamati untuk variasi kecepatan di tikungan dan pengaruh penggunaan sistem tilting terhadap nilai kriteria tersebut. Kriteria yang digunakan adalah kriteria Y/Q Nadal $\leq 0,8$ berdasarkan UIC 518 (2009) dan kriteria wheel unloading $\Delta Q/Q \leq 0,6$ berdasarkan EN 14363 (2016) dan GMRT 2141 (2009).

Pengujian model kereta tilting terhadap data pada literatur Nishioka (1997) dan Persson (2008) menjadi tahap terakhir untuk memastikan bahwa kereta dan sistem tilting yang dimodelkan bekerja dengan baik. Parameter yang diamati adalah percepatan lateral yang bekerja pada kerangka acuan badan kereta. Pengujian terhadap literatur Persson (2008) dilakukan penyesuaian lebar sepur. Variasi koefisien fleksibilitas dan mengatur besar sudut tilting masukan dilakukan untuk mendekati data hasil percobaan yang ada pada literatur Nishioka (1997).

4. Rencana dan Pengujian Peningkatan Kecepatan pada Lintas Jakarta – Bandung

Pada penelitian ini, peningkatan kecepatan direncanakan pada tikungan yang memiliki radius antara 150 hingga 600 meter pada lintas KA Jakarta – Bandung. Dalam data kereta ukur DJKA terdapat batas kecepatan untuk setiap lintas dan tikungan. Peningkatan kecepatan direncanakan secara analitik dan diuji melalui simulasi untuk beberapa tikungan. Dalam merencanakan hal tersebut, jalan rel pada lintas Jakarta – Bandung dianggap tidak memiliki ketidakteraturan atau geometri rel dianggap konstan. Dengan asumsi

tersebut, rencana peningkatan kecepatan yang dilakukan dapat dilihat pada rincian di bawah ini.

- Kecepatan maksimum kereta baik di segmen lintasan lurus maupun tikungan adalah 120 km/jam, dengan pertimbangan kecepatan kereta pada segmen sebelum dan setelahnya.
- Karena lintas Jakarta – Cikampek dianggap cukup lurus dengan radius tikungan besar, kereta direncanakan beroperasi dengan kecepatan 120 km/jam.
- Kecepatan kereta di suatu tikungan ditingkatkan dengan syarat percepatan lateral yang dihitung secara analitik $a_{(yc-analitik)} \leq 0,62$ m/s². Nilai tersebut dihitung 20% lebih rendah dari 0,78 m/s² untuk mengantisipasi efek dari koefisien fleksibilitas suspensi ketika dilakukan simulasi.
- Sudut tilting yang diberikan pada badan kereta saat melewati tikungan dengan radius 150 – 600 meter adalah $\phi \leq 6^\circ$.

Simulasi dilakukan untuk melihat kurva percepatan lateral pada kerangka acuan badan kereta yang bekerja untuk batas kecepatan sistem dan kecepatan setelah ditingkatkan. Pada kurva juga akan diamati pengaruh pemberian sudut tilting pada badan kereta sesuai yang direncanakan.

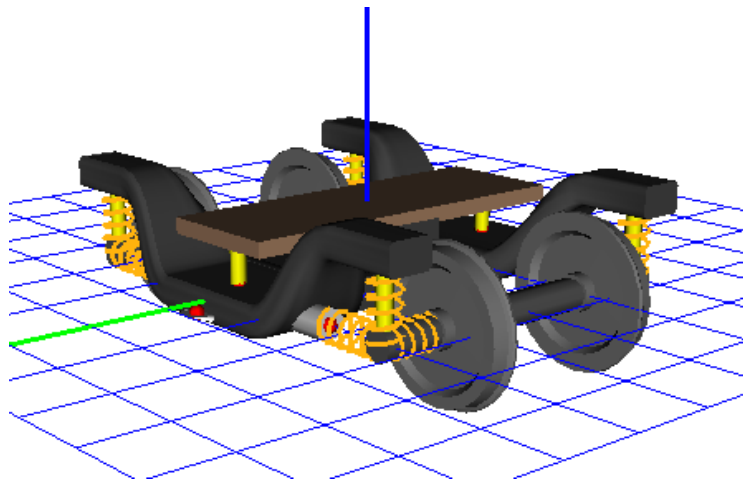
III. Hasil dan Pembahasan

A. Pemodelan dan Validasi Model Kereta Tilting

Gambar 6 menampilkan model bogie kereta tilting. Dengan menambahkan komponen bogie dengan badan kereta melalui suspensi sekunder, kereta tilting telah selesai dimodelkan yang ditunjukkan pada **Gambar 7**.

Berdasarkan hasil perhitungan analitik dan simulasi kondisi statis yang ditampilkan pada **Tabel 3**, perbedaan nilai gaya vertikal pada roda yang diperoleh dari kedua metode perhitungan tersebut sebesar 0,00% atau tidak terdapat perbedaan. Hal ini berarti gaya berat total kereta terbagi merata ke setiap roda. Nilai gaya vertikal pada roda kiri dan roda kanan juga tidak memiliki perbedaan yang menandakan bahwa roda kiri dan roda kanan memiliki radius gelinding yang sama besar ketika berkontak dengan rel. Hal ini juga mengindikasikan bahwa posisi lateral pusat massa kereta tepat berimpit dengan garis tengah rel. Oleh karena itu, model kereta bisa dikatakan berhasil divalidasi di kondisi statis.

Tabel 4 menunjukkan perbandingan nilai yang diperoleh melalui perhitungan analitik dengan hasil simulasi di lintasan lurus. Perbedaan nilai



Gambar 6 Model Bogie Kereta Tilting



Gambar 7 Model Kereta Tilting

gaya vertikal pada roda hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi memiliki perbedaan paling besar yaitu 3,35 N (0,01% dari hasil simulasi) pada perangkat roda 1 yang merupakan roda paling depan. Perbedaan nilai tersebut terbilang sangat kecil sehingga masih bisa diterima. Kereta dapat dikatakan tervalidasi untuk gerak pada lintasan lurus.

Berdasarkan **Tabel 5**, nilai gaya vertikal pada roda dari hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi memiliki perbedaan. Hal ini terjadi karena gerak berbelok kereta yang terjadi bukan merupakan ideal curving dimana seharusnya setiap roda luar memiliki radius gelinding yang sama, begitu juga dengan radius gelinding seragam untuk semua roda dalam. Selain itu, flensa roda luar pada perangkat roda 1 dan 3 berkontak dengan rel selama berbelok, sementara roda luar pada perangkat roda 2 dan 4 tidak seperti ditunjukkan pada **Gambar 8**. Kontak flensa roda

luar dengan rel membuat kereta seolah bergerak pada kondisi cant deficiency karena masih mendapatkan gaya dalam arah lateral sehingga memiliki nilai gaya vertikal pada roda luar yang lebih besar dibandingkan pada roda dalam. Namun karena persen beda yang diperoleh masih kurang dari 5%, model bisa dianggap masih merepresentasikan karakteristik dinamika gerak kereta di tikungan.

Hasil perbandingan di **Tabel 6** menunjukkan terdapat perbedaan pada nilai frekuensi dengan modus lower bounce. Persen beda yang diperoleh pada modus tersebut sebesar 1,12%. Nilai tersebut masih cukup kecil sehingga model dapat dianggap valid, terlebih pada modus upper bounce tidak terdapat perbedaan antara hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi. Berdasarkan keseluruhan tahap validasi, model kereta tilting yang dibuat sudah valid untuk selanjutnya memasuki tahap simulasi pengujian.

Tabel 3 Perbandingan Gaya Vertikal Roda di Kondisi Statis

Roda	Gaya Vertikal Roda (N)		Beda ¹ (N)	Persen Beda ²
	Analitik	Simulasi		
Kiri perangkat roda 1	55.036,55	55.036,55	0,00	0,00%
Kanan perangkat roda 1	55.036,55	55.036,55	0,00	0,00%
Kiri perangkat roda 2	55.036,55	55.036,55	0,00	0,00%
Kanan perangkat roda 2	55.036,55	55.036,55	0,00	0,00%
Kiri perangkat roda 3	55.036,55	55.036,55	0,00	0,00%
Kanan perangkat roda 3	55.036,55	55.036,55	0,00	0,00%
Kiri perangkat roda 4	55.036,55	55.036,55	0,00	0,00%
Kanan perangkat roda 4	55.036,55	55.036,55	0,00	0,00%

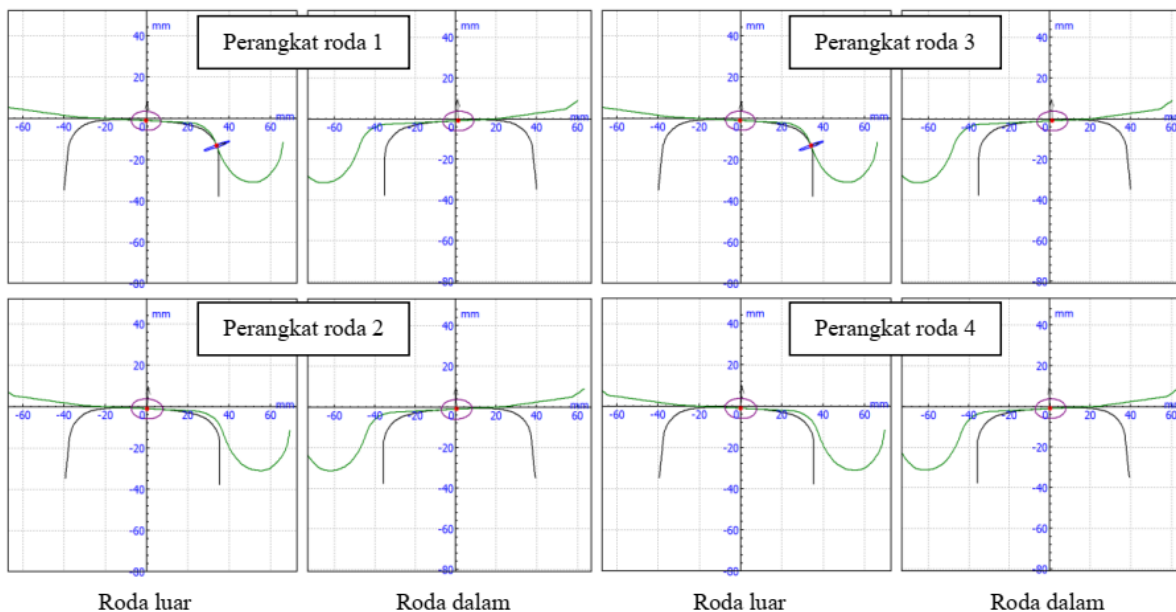
¹ Nilai dihitung dengan mencari selisih mutlak antara nilai analitik dan simulasi² Persentase dihitung dengan membandingkan beda nilai terhadap nilai simulasi*Sumber: Hasil Analisis, 2021***Tabel 4** Perbandingan Gaya Vertikal Roda di Lintasan Lurus

Roda	Gaya Vertikal Roda (N)		Beda ¹ (N)	Persen Beda ²
	Analitik	Simulasi		
Kiri perangkat roda 1	55.036,55	55.033,20	3,35	0,01%
Kanan perangkat roda 1	55.036,55	55.033,20	3,35	0,01%
Kiri perangkat roda 2	55.036,55	55.035,65	0,90	0,00%
Kanan perangkat roda 2	55.036,55	55.035,65	0,90	0,00%
Kiri perangkat roda 3	55.036,55	55.034,15	2,40	0,00%
Kanan perangkat roda 3	55.036,55	55.034,15	2,40	0,00%
Kiri perangkat roda 4	55.036,55	55.034,99	1,56	0,00%
Kanan perangkat roda 4	55.036,55	55.034,99	1,56	0,00%

¹ Nilai dihitung dengan mencari selisih mutlak antara nilai analitik dan simulasi² Persentase dihitung dengan membandingkan beda nilai terhadap nilai simulasi*Sumber: Hasil Analisis, 2021***Tabel 5** Perbandingan Gaya Vertikal Roda di Tikungan

Roda	Gaya Vertikal Roda (N)		Beda ¹ (N)	Persen Beda ²
	Analitik	Simulasi		
Luar perangkat roda 1	55.146,24	56.562,58	1.416,34	2,50%
Dalam perangkat roda 1	55.146,24	53.675,82	1.470,42	2,74%
Luar perangkat roda 2	55.146,24	55.419,13	272,89	0,49%
Dalam perangkat roda 2	55.146,24	54.744,28	401,96	0,73%
Luar perangkat roda 3	55.146,24	55.880,03	733,79	1,31%
Dalam perangkat roda 3	55.146,24	54.282,63	863,61	1,59%
Luar perangkat roda 4	55.146,24	55.857,99	711,75	1,27%
Dalam perangkat roda 4	55.146,24	54.299,86	846,38	1,56%

¹ Nilai dihitung dengan mencari selisih mutlak antara nilai analitik dan simulasi² Persentase dihitung dengan membandingkan beda nilai terhadap nilai simulasi*Sumber: Hasil Analisis, 2021*



Gambar 8 Kontak Roda – Rel di Tikungan

Tabel 6 Perbandingan Frekuensi Pribadi Model Kereta Tilting

Modus Getar	Frekuensi Pribadi (Hz)		Beda ¹ (Hz)	Persen Beda ²
	Analitik	Simulasi		
Frekuensi <i>upper bounce</i>	1,07	1,07	0,00	0,00%
Frekuensi <i>lower bounce</i>	7,20	7,12	0,08	1,12%

¹ Nilai dihitung dengan mencari selisih mutlak antara nilai analitik dan simulasi

² Persentase dihitung dengan membandingkan beda nilai terhadap nilai simulasi

Sumber: Hasil Analisis, 2021

B. Pengujian Model Kereta Tilting

Pengujian pertama dilakukan untuk melihat pengaruh penambahan cant terhadap percepatan lateral badan kereta a_{yc} . Percepatan lateral pada kerangka acuan badan kereta mengalami pengurangan seiring bertambahnya tinggi cant. Perbandingan nilai percepatan lateral yang diperoleh secara kuantitatif disajikan dalam **Tabel 7**. Nilai percepatan lateral a_{yc} memiliki perbedaan cukup besar terhadap hasil perhitungan analitik. Perbedaan semakin besar untuk cant deficiency yang besar. Hal ini disebabkan adanya gerak roll badan kereta. Pada kondisi cant deficiency, kereta mengalami gerak roll ke arah luar sehingga kompensasi percepatan sentrifugal oleh komponen gravitasi berkurang. Hal sebaliknya terjadi saat cant excess, kompensasi oleh komponen gravitasi terjadi secara berlebih karena gerak roll badan kereta ke arah dalam.

Penggunaan tilting dalam mengompensasi nilai percepatan lateral badan kereta yang tidak dapat dikompensasi dengan cant menjadi fokus utama yang diamati pada pengujian kedua. Nilai percepatan yang diperoleh melalui simulasi dibandingkan dengan nilai yang diperoleh melalui

perhitungan analitik yang dapat dilihat pada **Tabel 8**. Selain itu, sudut roll badan kereta juga diamati untuk mengetahui kesesuaian sudut tilting yang diberikan dengan sudut roll yang terbentuk. Dalam hal ini, sudut tilting menjadi input pada aktuator untuk memiringkan badan kereta. Sementara, sudut roll adalah output kemiringan badan kereta yang diperoleh setelah tilting diberikan.

Tabel 8 berisi perbandingan kuantitatif antara percepatan lateral badan kereta yang hasil perhitungan analitik dengan hasil simulasi dan sudut tilting dengan sudut roll yang dibentuk badan kereta. Pada kondisi cant deficiency, percepatan lateral hasil simulasi lebih tinggi dibandingkan hasil perhitungan analitik. Hal ini disebabkan gerak roll badan kereta ke arah luar yang tidak diharapkan akibat fleksibilitas suspensi. Akibatnya, badan kereta membentuk suatu sudut yang tidak sesuai dengan kondisi seharusnya terhadap bogie yang menyebabkan berkurangnya kompensasi gaya sentrifugal oleh komponen gravitasi. Sifat tersebut kerap kali menyebabkan kurang optimalnya sistem tilting bekerja pada suatu kereta.

Pengujian ketiga dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi nilai koefisien fleksibilitas terhadap nilai percepatan lateral dan sudut roll badan kereta. **Tabel 9** menyajikan nilai koefisien fleksibilitas dengan memvariasikan nilai kekakuan batang anti-roll. Percepatan lateral dan sudut roll badan kereta mengalami perbedaan nilai ketika koefisien fleksibilitas divariasikan, seperti terlihat pada Tabel 10. Ketika koefisien fleksibilitas yang digunakan kecil, sudut roll yang dibentuk badan kereta semakin mendekati sudut tilting yang diharapkan. Hal serupa terjadi pada parameter percepatan lateral. Ini disebabkan karena semakin kaku sistem suspensi, gerak roll yang tidak diharapkan akan semakin kecil. Baik percepatan lateral maupun sudut roll tidak dapat bernilai sama persis dengan nilai yang diharapkan karena sistem suspensi yang digunakan masih memiliki sifat elastis meskipun sudah ditambahkan batang anti-roll.

Pemberian *tilting* pada badan kereta dilihat pengaruhnya terhadap kriteria keamanan terhadap

peristiwa keluar rel di pengujian keempat. Kriteria Nadal Y/Q dan *wheel unloading* pada roda luar perangkat roda 1 dan 3 (WS1 luar dan WS3 luar) pada kondisi rel teratur dan memiliki ketidakaturan ditampilkan pada **Gambar 9(a)** Nilai Y/Q relatif tidak ada perbedaan antar-skenario pengujian dan nilainya tidak melebihi batas maksimum. Sementara untuk kriteria *wheel unloading* dapat dilihat perubahan yang cukup signifikan dalam penggunaan sistem tilting. Pada **Gambar 9(b)** ditunjukkan saat kereta bergerak di tikungan dengan kecepatan setimbang 40 km/jam, nilai *wheel unloading* cukup jauh dari batasnya. Ketika kecepatan kereta ditingkatkan menjadi 57 km/jam, kereta berada di kondisi *cant deficiency*. Hal ini yang menyebabkan kriteria *wheel unloading* menyentuh nilai batas seperti diperlihatkan pada **Gambar 9(d)**.

Penggunaan sistem *tilting* dapat diamati pada **Gambar 9(f)**. Nilai *wheel unloading* berkurang

Tabel 7 Percepatan Lateral pada Pengujian Pengaruh Cant

V (km/jam)	R (m)	h (mm)	$a_{yc-analitik}$ (m/s ²)	$a_{yc-simulasi}$ (m/s ²)	h_{def} (mm)
80	600	0	0,82	0,95	94
		20	0,65	0,75	74
		40	0,47	0,55	54
		60	0,30	0,35	34
		80	0,12	0,15	14
		94	0,00	0,01	0
		110	-0,14	-0,15	-16

Sumber: Hasil Analisis, 2021

Tabel 8 Percepatan Lateral dan Sudut Roll pada Pengujian Pengaruh Tilting

V (km/jam)	R (m)	h (mm)	φ (°)	φ_{roll} (°)	$a_{yc-analitik}$ (m/s ²)	$a_{yc-simulasi}$ (m/s ²)	Kondisi Cant
80	600	0	0,0	-0,7	0,82	0,95	Cant Deficiency
80	600	94	0,0	0,0	0,00	0,01	Ideal Cant
113	600	94	0,0	-0,7	0,81	0,95	Cant Deficiency
113	600	94	4,7	5,0	0,00	-0,03	Ideal Cant
139	600	94	4,7	4,3	0,83	0,93	Cant Deficiency

Sumber: Hasil Analisis, 2021

Tabel 9 Koefisien Fleksibilitas untuk Variasi Kekakuan Batang Anti-roll

K (Nm/rad)	$S_{analitik}$	$S_{simulasi}$
0	0,30	(a) 0,25
$1,88 \times 10^6$	0,16	0,15
$9,40 \times 10^9$	0,06	0,07

Sumber: Hasil Analisis, 2021

sehingga menjauhi garis batas pada kurva. Jika diamati, pengurangan yang terjadi tidak secara signifikan mengembalikan kurva seperti pada **Gambar 9(b)** Hal ini dapat terjadi karena adanya gerak *roll* badan kereta ke arah luar yang mengurangi besar sudut *tilting* pada badan kereta. Namun, hasil tersebut sudah cukup menunjukkan bahwa *tilting* pada badan kereta dapat mengurangi risiko terjadinya peristiwa keluar rel.

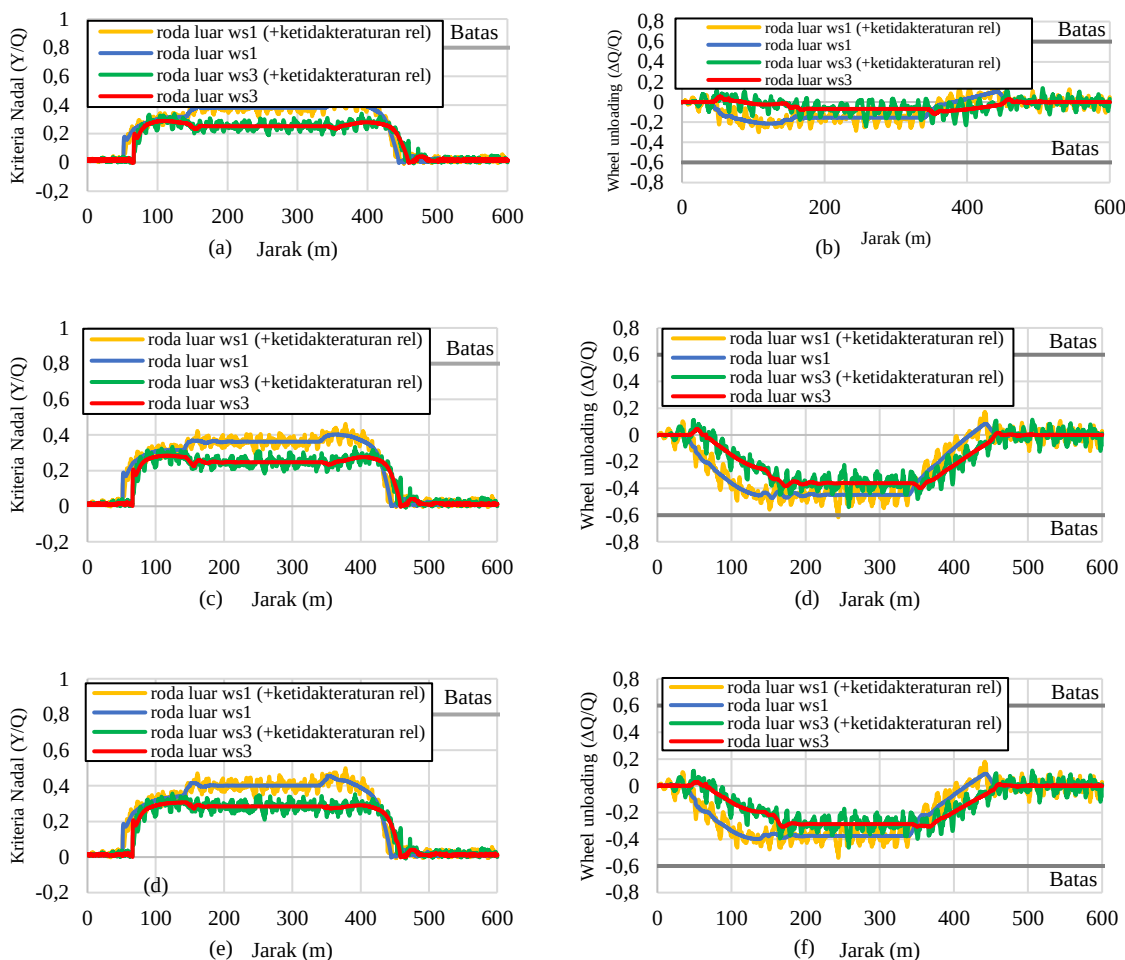
Pengujian sistem tilting terhadap data dalam literatur dimulai dengan pengujian terhadap

literatur Persson (2008). Hasil simulasi pengujian tersebut dapat dilihat pada **Tabel 11**. Percepatan lateral badan kereta hasil simulasi memiliki perbedaan cukup signifikan untuk kondisi cant deficiency, yaitu ketika kereta melaju di tikungan tanpa cant dengan kecepatan 113 km/jam dan saat kecepatan 160 km/jam tanpa tilting. Hasil simulasi yang diperoleh berturut-turut 15,63% dan 17,64% lebih tinggi dari nilai pada literatur. Dengan demikian, sesuai yang dikatakan dalam literatur bahwa pada kondisi tersebut percepatan lateral sebenarnya 15 – 30% lebih tinggi yang

Tabel 10 Percepatan Lateral dan Sudut Roll untuk Variasi Koefisien Fleksibilitas

V (km/jam)	R (m)	h (mm)	φ (°)				a_{yc} (m/s ²)			
			<i>Tilt</i>	$S = 0,07$	$S = 0,15$	$S = 0,25$	Analitik	$S = 0,07$	$S = 0,15$	$S = 0,25$
80	600	0	0	-0,32	-0,71	-1,19	0,82	0,88	0,94	1,03
80	600	94	0	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
113	600	94	0	-0,32	-0,72	-1,20	0,81	0,88	0,95	1,03
113	600	94	4,7	4,99	5,01	5,03	0,00	-0,03	-0,03	-0,03
139	600	94	4,7	4,67	4,29	3,83	0,83	0,87	0,93	1,01

Sumber: Hasil Analisis, 2021



Gambar 9 Kriteria Nadal dan Wheel Unloading di Tikungan R150m

(Sumber: Hasil Analisis, 2021)

ditunjukkan oleh hasil simulasi. Saat tilting diterapkan pada kecepatan 166 km/jam, percepatan lateral badan kereta bernilai $-0,13 \text{ m/s}^2$ yang menandakan percepatan lateral memiliki arah ke dalam tikungan. Hal ini terjadi karena adanya gerak roll ke dalam pada badan kereta yang menyebabkan kompensasi percepatan sentrifugal terjadi secara berlebih. Namun demikian, hasil simulasi yang diperoleh sudah cukup menunjukkan sistem tilting bekerja dengan baik.

Pada **Gambar 10(a)**, data yang disajikan dengan titik-titik oranye merupakan pengujian riil di lapangan (Nishioka, 1997) sehingga memiliki besar deviasi yang bervariasi dengan nilai analitiknya. Terlihat bahwa pada kecepatan 93 km/jam, percepatan lateral cukup mendekati di semua variasi nilai koefisien fleksibilitas. Sementara, pada kecepatan 120 km/jam, percepatan lateral cukup mendekati saat koefisien fleksibilitas bernilai 0,25. Untuk kondisi lainnya, perbedaan nilai percepatan lateral cukup jauh dengan literatur dan bernilai di bawah nilai analitiknya. Hal ini menunjukkan terjadi kompensasi berlebih akibat gerak roll badan kereta ke dalam tikungan karena fleksibilitas suspensi. Hal berbeda dilakukan dengan mengatur besar sudut tilting input sehingga sudut roll badan kereta akan sama dengan sudut tilting yang tertera dalam literatur untuk mengatasi efek fleksibilitas

suspensi yang terjadi. **Gambar 10(b)** menunjukkan hasil simulasi tersebut, terlihat bahwa nilai percepatan lateral yang diperoleh mendekati nilai pada literatur. Dengan demikian, hasil simulasi yang diperoleh sudah cukup menunjukkan model sistem tilting bekerja dengan baik.

C. Peningkatan Kecepatan dan Pemangkas Waktu Tempuh Lintas KA Jakarta – Bandung

Hasil simulasi pengujian peningkatan kecepatan di lintas KA Jakarta – Bandung yang akan dibahas hanya pada tiga jenis tikungan. Pemilihan jenis dan radius tikungan dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dari kereta ukur DJKA. Tikungan radius 245 m mewakili tikungan dengan radius kecil, radius 592 m mewakili tikungan dengan radius besar, dan lengkung S yang memiliki radius 393 m dan 566 m. Hal ini dilakukan karena tikungan lain yang disimulasikan memiliki karakteristik kurva percepatan lateral badan kereta yang sama.

Kurva percepatan lateral badan kereta pada lengkung S dapat dilihat pada **Gambar 11**. Kecepatan kereta yang dinaikkan dari 46 km/jam menjadi 100 km/jam menyebabkan percepatan lateral juga meningkat hingga mencapai $1,75 \text{ m/s}^2$ pada lengkung pertama dan $1,25 \text{ m/s}^2$ pada lengkung kedua. Nilai tersebut melebihi batas

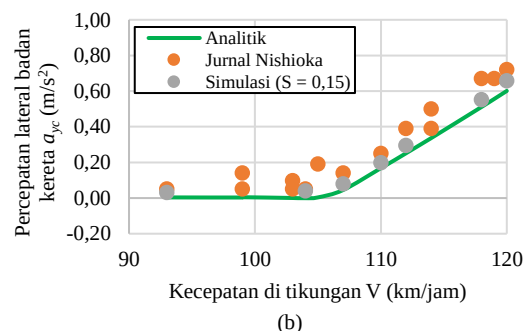
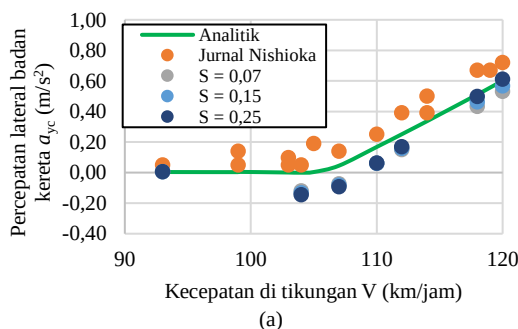
Tabel 11 Hasil Pengujian terhadap Literatur Persson (2008)

V (km/jam)	R (m)	h (mm)	φ (°)	a_{yc} (m/s ²)	
				Tesis	Simulasi
113	1.000	0	0	0,98 ²⁾	1,13
113	1.000	112	0	0	0,01
160	1.000	112	0	0,98 ²⁾	1,15
166	1.000	112	6,5 ¹⁾	0	-0,13
201	1.000	112	6,5 ¹⁾	0,98	1,01

¹⁾ Sudut *tilting* didasarkan pada sistem *tilting* aktif

²⁾ Nilai sebenarnya dapat mencapai 15 – 30% lebih tinggi

Sumber: Hasil Analisis, 2021



Gambar 10 Hasil Pengujian terhadap Literatur Nishioka (1997)

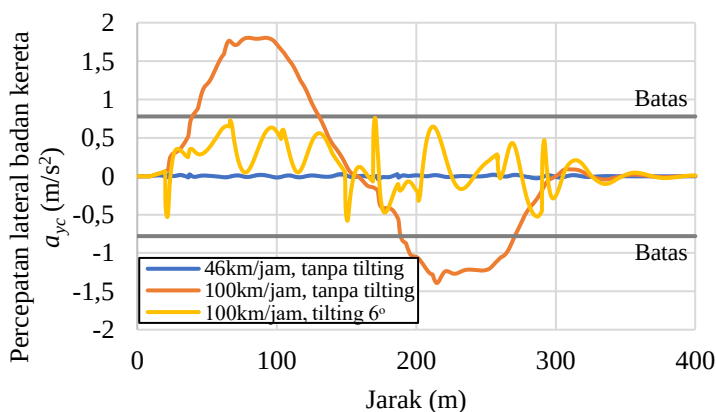
(Sumber: Hasil Analisis, 2021)

percepatan lateral yang digunakan pada penelitian ini, yaitu $0,78 \text{ m/s}^2$. Dengan memberikan sudut tilting sebesar 6° untuk kedua lengkung, besar percepatan lateral yang bekerja pada badan kereta berkurang menjadi di bawah batas.

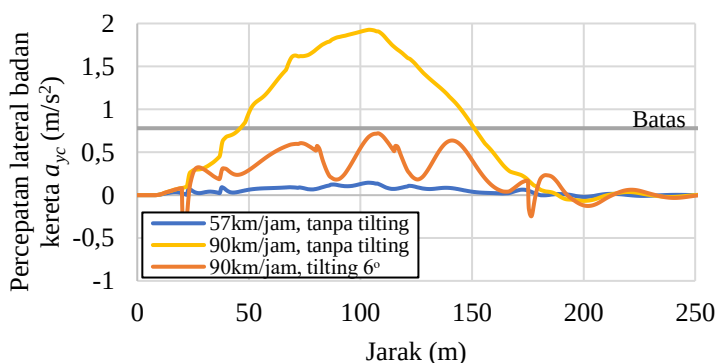
Selanjutnya untuk tikungan R245m pada **Gambar 12**, kereta bergerak di kondisi sedikit cant deficiency ketika kecepatannya 57 km/jam . Saat kecepatannya ditingkatkan menjadi 90 km/jam , puncak pecepatan lateral yang bekerja hampir menyentuh angka 2 m/s^2 yang berarti melebihi batas. Dengan menerapkan tilting sebesar 6° , percepatan lateralnya dapat dikurangi hingga dibawah $0,78 \text{ m/s}^2$. Karena tikungan R592m memiliki panjang lengkung 185 m , pada **Gambar 13** dapat diamati nilai percepatan saat kondisi steady di lengkung utama. Saat kecepatan kereta 57 km/jam , kereta melewati tikungan dengan kondisi cant excess. Ketika kecepatan ditingkatkan menjadi 97 km/jam , kereta melewati tikungan dengan kondisi cant deficiency dengan percepatan lateral steady $0,3 \text{ m/s}^2$. Karena nilai tersebut kurang dari $0,78 \text{ m/s}^2$, sebenarnya jika kereta dioperasikan dengan kecepatan 97 km/jam di tikungan R592m masih cukup aman. Jika sudut tilting diberikan sebesar $1,5^\circ$ pada kecepatan tersebut, kereta akan melewati tikungan pada kondisi ideal cant.

Jika diamati kurva percepatan lateral pada **Gambar 11** dan **Gambar 12**, terjadi osilasi dengan frekuensi rendah di lengkung utama saat sistem tilting diaktifkan seperti dijelaskan juga pada literatur Förstberg (2000) dan Persson (2011). Fenomena ini terjadi karena setiap panjang lengkung tersebut pendek dan memiliki radius kecil, yang jika terjadi hanya pada tikungan-tikungan tertentu yang tidak saling berlanjut tidak akan menimbulkan masalah kenyamanan. Namun jika terjadi sebaliknya, hal tersebut dapat menimbulkan gejala motion sickness pada penumpang. Salah satu solusinya adalah dengan membuat kontrol pada sistem tilting yang pada penelitian ini belum ada.

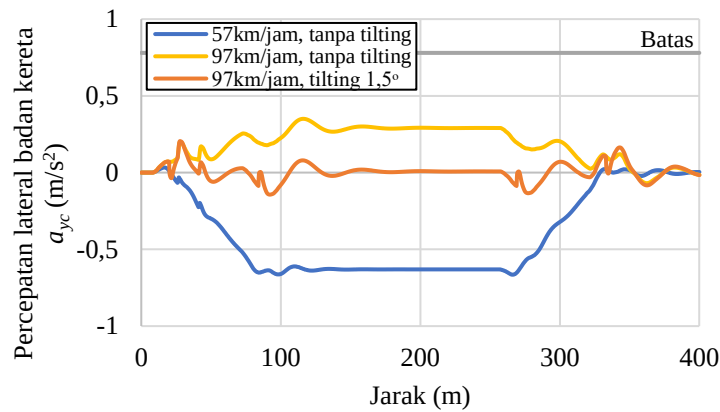
Keseluruhan simulasi pengujian ini dilakukan tanpa menerapkan ketidakteraturan rel. Dengan demikian, peningkatan kecepatan yang direncanakan dalam kondisi yang ideal dan optimis untuk setiap lengkungnya. Dengan mengetahui besarnya kecepatan rata-rata yang direncanakan untuk setiap lintas dan panjang setiap lintas, waktu tempuh kereta tilting di lintas KA Jakarta – Bandung bisa diperoleh. Perbandingan waktu tempuh antara kereta tilting dan kereta konvensional di lintas tersebut dapat dilihat pada **Tabel 12** beserta pemangkasan waktu tempuhnya.



Gambar 11 Percepatan Lateral Badan Kereta di Lengkung S (R393m dan R566m)



Gambar 12 Percepatan Lateral Badan Kereta di Tikungan R245m



Gambar 13 Percepatan Lateral Badan Kereta di Tikungan R592m

Tabel 12 Perbandingan Waktu Tempuh Lintas KA Jakarta – Bandung

Lintas	Panjang (km)	Kereta Konvensional		Kereta Tilting		ΔT (jam)
		$V_{rata-rata}$ (km/jam)	T (jam)	$V_{rata-rata}$ (km/jam)	T (jam)	
Jakarta – Cikampek	75,467	–	–	120	0,63	–
Cikampek – Rende	54,939	–	–	104	0,53	–
Rende – Cilame	15,821	–	–	98	0,16	–
Cilame – Padalarang	7,305	–	–	115	0,06	–
Padalarang – Bandung	14,662	–	–	118	0,12	–
Total	168,194	56	3,50 ¹⁾	112	2,00 ¹⁾	1,50

¹⁾Total 30 menit tambahan untuk waktu berhenti di stasiun antara
Sumber: Hasil Analisis, 2021

Pemangkasan waktu tempuh diperoleh sebesar 1,5 jam ketika kereta tilting dioperasikan pada lintas KA Jakarta – Bandung dengan kecepatan rata-rata setiap lintas tertera pada **Tabel 12**. Perlu diingat bahwa kondisi peningkatan ini merupakan kondisi ideal dimana rel dianggap tidak memiliki ketidakteraturan serta optimis bahwa kereta beroperasi maksimal pada kecepatan tersebut. Apabila kereta tidak beroperasi dengan kecepatan rencana melainkan lebih rendah, pemangkasan waktu yang diperoleh juga akan lebih rendah. Misalkan kereta dioperasikan dengan kecepatan rata-rata setiap lintas memiliki margin sebesar 30% dari kecepatan rencana untuk mempertimbangkan ketidakteraturan rel, waktu tempuh kereta ditambah waktu berhenti akan menjadi 2,65 jam. Dengan demikian, pemangkasan waktu tempuhnya menjadi sebesar 51 menit.

IV. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan adalah pemodelan kereta tilting telah berhasil dilakukan dengan sistem tilting dimodelkan melalui aktuator

tilting sebagai sambungan (joint) yang panjangnya berupa fungsi terhadap waktu, namun belum dilengkapi sistem kontrol. Model tersebut sudah tervalidasi melalui empat metode dengan persen beda kurang dari 5% terhadap hasil simulasi dan menunjukkan karakteristik yang sesuai dengan kereta sebenarnya. Simulasi dinamik yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem tilting bekerja dengan baik dalam mengurangi percepatan lateral badan kereta yang bekerja, meningkatkan keamanan terhadap peristiwa keluar rel, dan nilai percepatan yang diperoleh mendekati nilai dalam literatur. Namun, sistem tilting belum bekerja optimal karena fleksibilitas suspensi menyebabkan besar sudut tilting berkurang ataupun bertambah.

Dengan mengabaikan ketidakteraturan rel, kereta direncanakan beroperasi dengan kecepatan rata-rata 112 km/jam di lintas KA Jakarta – Bandung dengan rincian pada Tabel 12. Dengan demikian, perjalanan dari Jakarta menuju Bandung atau sebaliknya dengan menggunakan kereta tilting dapat ditempuh dalam waktu kurang dari dua jam, dengan asumsi waktu berhenti total di semua stasiun antara maksimum 30 menit.

V. Saran

Saran yang diberikan terkait penelitian lanjutan dari topik penelitian ini adalah perlu adanya studi mengenai kereta tilting dengan memperhitungkan ketidakrataan jalan rel untuk mendapatkan peningkatan kecepatan yang lebih tepat serta perlu adanya kajian mengenai pembuatan sistem kontrol dalam sistem tilting untuk mengatasi gerak roll badan kereta akibat fleksibilitas suspensi dan osilasi frekuensi rendah (motion sickness) untuk lengkung tikungan yang pendek agar tilting yang diberikan pada badan kereta lebih optimal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang membimbing dan membantu dalam proses penelitian ini serta PT INKA yang telah memberikan data yang diperlukan dalam melakukan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- ArcGIS Online. Peta Jalur Kereta Api Jawa. <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=27b7119dc6754d3e9e584a4fa71e5744>. Diakses 27 Desember 2020.
- Badan Pusat Statistik. 2020. Jumlah Penumpang Kereta Api, 2006-2020 (Ribuan Orang). <https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/815>. Diakses 22 Desember 2020.
- European Committee for Standardization. 2016. EN 14363: Railway applications – Testing and Simulation for the Acceptance of Running Characteristics of Railway Vehicles – Running Behaviour and Stationary Tests. European Committee for Standardization.
- Förstberg, J. 2000. Ride Comfort and Motion Sickness in Tilting Trains: Human Responses to Motion Environments in Train Experiment and Simulator Experiments. Doctoral Thesis. Department of Vehicle Engineering Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- International Union of Railways (UIC). 2009. UIC Code 518: Testing and Approval of Railway Vehicles from The Point of View of Their Dynamic Behaviour – Safety – Track fatigue – Running Behaviour. International Union of Railways (UIC).
- Kim, G., et al. 2011. Development of the Korean Tilting-Train and Its Simulated Run-Time Comparison With Non-Tilting. Association for European Transport and Contributors.
- Menteri Perhubungan Republik Indonesia. 2012. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- Nishioka, Y., et al. 1997. Tilting Control System for Railway Vehicles Using Long-Stroke Air Spring. The Sumitomo Search. Volume 49 Jilid 4, Hal. 102-107.
- Persson, R. 2008. Tilting trains: Technology, benefits and motion sickness. Licentiate Thesis. Aeronautical and Vehicle Engineering Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- Persson, R. 2011. Tilting trains: Enhanced benefits and strategies for less motion sickness. Doctoral Thesis. Aeronautical and Vehicle Engineering Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- PT. KAI. 2017. Lintas Cikampek Purwakarta Bandung, Heritage – KAI. <https://heritage.kai.id/page/Lintas%20Cikampek%20Purwakarta%20Bandung>. Diakses 7 September 2021.
- Putra, E. D. J. 2021. Studi Awal Kereta Tilting di Indonesia: Studi Kasus pada Lintas KA Jakarta – Bandung. Tugas Sarjana. Teknik Mesin FTMD ITB, Bandung.
- Railway Group Standard GM/RT2141. 2009. Issue 3 Resistance of Railway Vehicles to Derailment and Roll-Over. Rail Safety and Standards Board Limited.
- Rizaldi, B. A. 2020. KAI meluncurkan kereta Jakarta-Bandung dengan waktu tempuh lebih cepat. ANTARA. <https://www.antaranews.com/berita/1086314/kai-luncurkan-kereta-jakarta-bandung-dengan-waktu-tempuh-lebih-cepat>. Diakses 17 Desember 2020.
- Rochat, F. 2007. Simplified Tilt. Master of Science Thesis. KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm.
- Shabana, A. A., et al. 2008. Railroad Vehicle Dynamics A Computational Approach. CRC Press, Boca Raton.
- Wikaranadhi, P. 2020. Simulasi Dinamik Kereta Api Ringan Berdasarkan Standar EN 14363:2016. Tugas Sarjana. Teknik Mesin FTMD ITB, Bandung.
- Zhang, K & Lu, Z. 2016. The Design and Analysis on Intensity of Anti-Roll Bar on 100 % Low-Floor Light Rail Vehicle. Proceedings of the 6th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials, Huhhot. Hal. 138–142.