

# Simulasi Dinamis pada Kereta Penumpang Stainless Steel New Generation menggunakan Metode Multibody Dynamic System

Saka Marga Redi<sup>1</sup>, Email: sakamargaredi17@gmail.com

Agus Susanto<sup>2</sup>, Email: agus\_eng.dept@pnm.ac.id

Bi Asngali<sup>3</sup>, Email: biasngalimt@pnm.ac.id

Michael Martin<sup>4</sup>, Email: michael.martin@inka.co.id

Prasetya Adi Nugraha<sup>5</sup>, Email: prasetya.anugraha@inka.co.id

Perkeretaapian<sup>1,2,3</sup>, Politeknik Negeri Madiun<sup>1,2,3</sup>

Departemen Engineering<sup>4,5</sup>, PT. INKA (Persero)<sup>4,5</sup>

## ABSTRAK

Kereta penumpang *stainless steel* merupakan jenis kereta yang paling banyak beroperasi di Indonesia. Hal ini karena kereta ini memberikan fasilitas lengkap, berbiaya ekonomis, dan menawarkan jam operasi yang lebih banyak. Kereta penumpang *stainless steel* difabrikasi oleh PT. Industri Kereta Api (PT. INKA) dari generasi pertama hingga sekarang, dan terus mengalami perkembangan inovasi. Kereta ini sedang dikembangkan agar mencapai kecepatan lebih dari 120 Km/jam dengan tetap menjaga tingkat keamanan dan kenyamanan, serta disebut sebagai kereta penumpang *stainless steel new generation* (SS-NG). Untuk mencapai hal tersebut, salah satu caranya adalah dengan mendesain ulang struktur bogie kereta. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis desain bogie pada rangkaian kereta SS-NG dengan metode simulasi *system multibody dynamic* untuk mengkaji dinamika kereta serta membandingkannya dengan dinamika kereta *existing*, yakni SS-2018. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain bogie kereta SS-NG memberikan tingkat kenyamanan pada arah vertikal dan lateral sesuai dengan *Sperling comfort index* pada pusat *carbody*, pusat bogie depan dan belakang saat kereta beroperasi pada kecepatan 240 Km/jam.

*Kata Kunci: Simulasi multibody dynamic, kereta penumpang, desain bogie, kestabilan kereta, kenyamanan kereta*

## ABSTRACT

*Stainless steel passenger coach is the most operated passenger coach in Indonesia. Because it has better facilities, cheap, and offering more operation hour. Stainless steel passenger coach fabricated by PT. Industri Kereta Api (PT. INKA) and always improve and keep innovate from generation to generation. At this time, This passenger coach being upgraded to reach the speed more than 120 Km/h and keep the ride quality and ride comfort index and called as stainless steel new generation (SS-NG) passenger coach. To reach the target one of the method is re-design the structure of bogie. The purpose of this research is to analyzing design of the SS-NG bogie, on SS-NG passenger coach using multibody dynamic simulation to studying rolling stock dynamic and compare it with existence bogie dynamic of SS-2018 passenger coach. The result of the simulation show the SS-NG bogie design give vertical and lateral ride comfort index appropriate to Sperling comfort index on center of carbody, center of front and rear bogie while operating at 240 Km/h.*

*Keywords: Multibody Dynamic Simulation, Passenger Coach, Bogie Design, Train Stability, Train Comfort*

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan kereta api di Indonesia semakin lama semakin bervariasi, dari segi kecepatan, kenyamanan, dan keamanan dari kereta api. Kereta penumpang *stainless steel* merupakan jenis kereta penumpang yang paling banyak beroperasi di Indonesia. Hal ini karena

kereta ini memberikan fasilitas lebih lengkap, seperti kapasitas penumpang sebanyak 50 kursi setiap gerbong dan dilengkapi dengan Air Conditioner (AC), serta berbiaya ekonomis. Menurut agen penjual tiket kereta api resmi, harga tiket antara stasiun di kota Purwokerto hingga stasiun di kota Jember yang berjarak 661 Km hanya Rp 210.000,-. Selain itu, kereta

*stainless steel* juga menawarkan jam operasi yang lebih banyak, yaitu beroperasi rata – rata interval 1 jam tiap keberangkatan.

Salah satu kereta penumpang *stainless steel* ditampilkan pada **Gambar 1**. Kereta ini difabrikasi oleh PT. Industri Kereta Api (PT. INKA) sejak tahun 2018 yang didesain memiliki kecepatan maksimal 120 Km/jam dan kecepatan operasional sebesar 100 Km/jam. Dalam perkembangannya, kereta penumpang *stainless steel* terus mengalami perkembangan dan inovasi. Kereta ini sedang dikembangkan agar mampu menempuh jarak dengan kecepatan lebih baik dari sebelumnya dengan tetap menjaga tingkat keamanan (*ride quality index*) dan kenyamanan (*ride comfort index*) dan disebut sebagai kereta penumpang *stainless steel new generation* (SS-NG). Untuk mencapai hal tersebut, salah satu caranya adalah dengan mendesain ulang struktur bogie dari kereta tersebut dan menganalisisnya.



**Gambar 1.** Kereta penumpang *stainless steel* 2018 [10]

Kalivoda, dan Nedhuza [5] membahas tingkat keamanan kereta terhadap anjlok yang merupakan salah satu syarat izin jalan pada standar EN 14363 yang dilakukan menggunakan simulasi *multibody dynamic*. Liu, et al. [7] membahas hubungan sebab-akibat antara kondisi rel dan *derailment* yang berakibat kecelakaan. Mereka menginformasikan bahwa mayoritas penyebab *derailment* adalah *crack* pada rel dan daerah pengelasan rel yang patah. Selain itu, terdapat juga penyebab minoritas *derailment*, yakni *human error* karena tidak memperlambat kereta saat melewati jalur berbelok.

Teknik simulasi *system multibody dynamic* telah umum digunakan untuk mensimulasikan perilaku kereta saat beroperasi, termasuk untuk mengetahui stabilitas, keamanan, dan kenyamanan. Dizo dan Blatnicky (2016) membahas tentang sistem *multibody dynamic* pada bidang kereta api yang sangat bermanfaat sebelum kereta benar-benar diproduksi [2]. Selain itu, simulasi *multibody dynamic* juga dapat

menginformasikan tentang stabilitas, kenyamanan, dan keamanan kereta yang dipengaruhi oleh kondisi rel yang meliputi tingkat kekasaran, kurva, dan lebar rel. Dizo, et al. [3] menyarankan penggunaan teknik simulasi *multibody dynamic* untuk struktur *rigid* dan *flexible body*, termasuk kereta api. Simulasi *multibody dynamic* dengan *flexible body* memiliki hasil analisis yang lebih detail daripada *rigid body* pada kereta api. Namun demikian, penggunaan *system multibody dynamic* dalam simulasi kereta api perlu memperhatikan parameter [6].



**Gambar 2.** Bogie kereta dari dereta penumpang *stainless steel* 2018 [10]

Penelitian ini bertujuan untuk mendesain ulang struktur bogie SS-2018 dan menganalisisnya dengan metode simulasi untuk mengkaji dinamika bogie serta membandingkannya dengan dinamika bogie saat ini (*existing*). Metode simulasi yang digunakan mengimplementasikan teknik simulasi *system multibody dynamic* karena metode ini dapat merepresentasikan sistem kompleks dan mempertimbangkan struktur yang dimodelkan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode pemodelan dan simulasi. Terdapat dua model yang disimulasikan yaitu model kereta penumpang *stainless steel* 2018 (SS-2018) dan model kereta penumpang *stainless steel new generation* (SS-NG). Simulasi dilakukan untuk mengetahui kestabilan dan kenyamanan kereta yang beroperasi pada kecepatan tinggi.

Stabilitas kereta dapat diketahui dengan mengetahui nilai *wave length* yang selanjutnya digunakan untuk menentukan osilasi. *Wave length* ditentukan berdasarkan persamaan berikut [11].

$$\Lambda = 2\pi \sqrt{\frac{r_0 l}{\lambda}} \quad (1)$$

dimana  $\Lambda$  merupakan total *wave length*,  $r_0$  adalah radius roda,  $l$  adalah setengah jarak dua kontak rel dan roda, dan  $\lambda$  adalah ukuran konisitas roda.

Tingkat kenyamanan kereta dapat dianalisa dengan pendekatan *Sperling* yaitu metode yang dikembangkan oleh J.L Koffman untuk mengukur profil aus berdasarkan kualitas pengendalian pada kecepatan maksimal sehingga didapatkan angka kenyamanan berkendara (*ride comfort index*) arah vertikal dan lateral [8]. Tingkat kenyamanan tersebut dibagi dalam berbagai kriteria, sebagai berikut;

**Tabel 1.** Tingkat kenyamanan berkendara (*ride comfort index*) [11]

Ride Index	Vibration Level	Ride Quality
1	Just Noticeable	Very Good
2	Clearly Noticeable	Good
2.5	More pronounced but not unpleasant	-
3	Strong, irregular but till tolerable	Tolerable
3.5	Very Strong and unpleasant	-
4	Extremely strong and unpleasant	Not tolerable
5	-	Dangerous

Terdapat dua metode untuk mendapatkan nilai dari ride comfort index, yang pertama menggunakan fitur pada aplikasi dan cara yang kedua adalah perhitungan secara analitik, yang dapat dihitung dengan persamaan 2. [12]

$$WZ = 0.896^{10} \sqrt{\frac{a^2}{f}} F(f) \quad (2)$$

dimana  $a$  adalah amplitudo maksimum percepatan dalam satuan cm/s,  $f$  adalah frekuensi dalam satuan Hz dan  $F(f)$  adalah bobot frekuensi yang berbeda untuk getaran vertikal dan lateral. Berdasarkan persamaan 2, dapat diubah penulisannya menjadi

$${}^{6.67} \sqrt{a^2 B^2} \quad (3)$$

Dengan factor B pada kenyamanan arah vertikal,

$$B_v = 0.588 \left[ \frac{1.1911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2} \right] \quad (4)$$

Sedangkan factor B pada arah lateral,

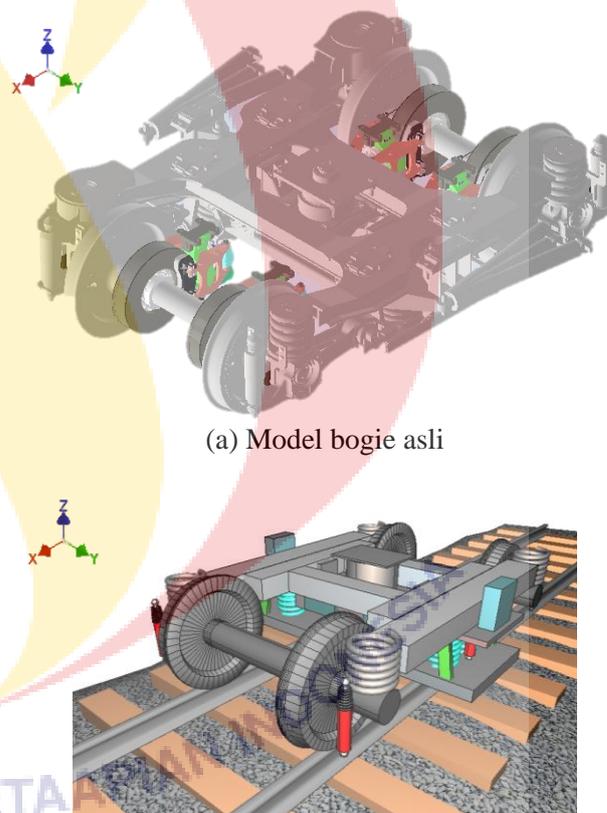
$$B_v = 0.737 \left[ \frac{1.1911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2} \right] \quad (5)$$

## 2.1 Pemodelan dan Simulasi Kereta Penumpang

**Gambar 3** menampilkan model bogie yang digunakan dalam simulasi. **Gambar 3(a)** merupakan bogie asli yang digunakan pada rangkaian kereta penumpang SS-NG. Dalam rangka untuk menganalisis dinamika, model bogie ini disederhanakan sebagaimana yang ditampilkan pada **Gambar 3(b)**. Penyederhanakan

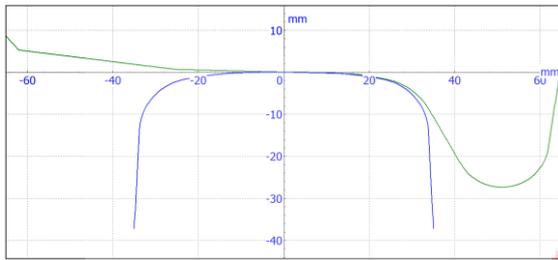
bertujuan agar komputasi dapat berjalan lebih ringan dan mendapatkan hasil yang akurat. Sebagaimana yang terlihat pada gambar, model ini terdiri-dari enam *vertical damper*, satu *lateral damper*, empat suspensi primer, delapan suspensi sekunder yang berupa *metal spring*, serta empat *swing link* yang digunakan untuk menghubungkan *bogie frame*, *bolster*, *spring plank*, dan *wheelset*.

**Gambar 4** adalah model kontak antara roda kereta dengan rel yang digunakan pada simulasi. Roda didesain dengan dimensi konisitas roda sebesar 1 : 40, radius roda 0,387 m, panjang axle sebesar 1,844 m, jarak pusat 0,565 m, massa 1500 Kg, dan lebar gauge rel adalah 1,067 m. Sebagaimana yang terlihat pada gambar ini, rel kereta api mempunyai lebar 70 mm dan rel ini akan terjadi kontak selama kereta beroperasi dalam simulasi. **Gambar 5(a)** merupakan model kereta penumpang SS-2018 dan merupakan model yang dikembangkan dalam penelitian ini. Model tersebut memiliki beberapa perbedaan dari model yang baru seperti, penggantian *rubber spring* pada suspensi primer, desain kerangka bogie yang berbeda, penambahan *yaw damper*. **Gambar 5(b)** merupakan model kereta penumpang SS-NG. Model ini didesain memiliki dua rangkaian bogie, empat *yaw damper*, dan satu *carbody*. Bogie dan *car body* dihubungkan dengan input pivot pada aplikasi.

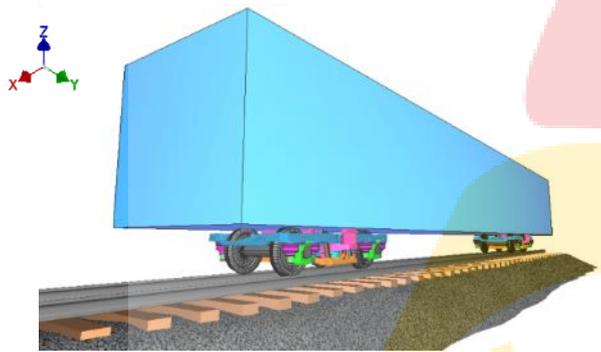


(b) Model Bogie MST 1014 yang disederhanakan

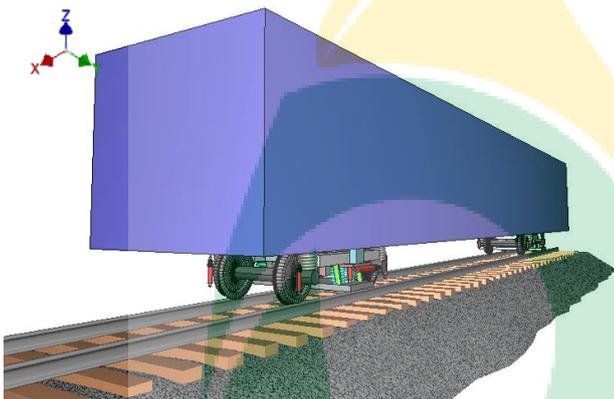
**Gambar 3.** Model Bogie yang digunakan dalam simulasi



Gambar 4. Desain kontak roda dan rel



(a) Model kereta penumpang SS-2018



(b) Model kereta penumpang SS-NG

Gambar 5. Model kereta penumpang SS 2018 dan SS-NG yang diaplikasikan pada simulasi

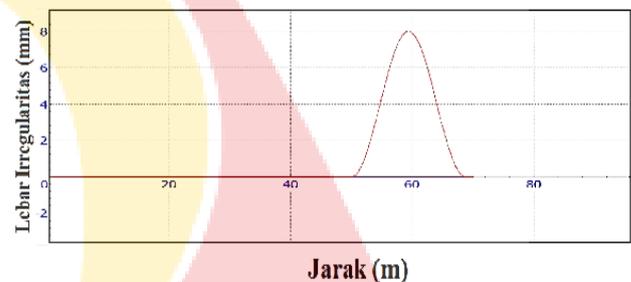
## 2.2 Parameter Model Simulasi

Selain model kereta penumpang seperti yang telah dijelaskan diatas, beberapa parameter diperlukan pada simulasi. Parameter tersebut adalah massa *carbody*, massa bogie, massa kereta, jarak antara pusat bogie dengan pusat *carbody*, dan jarak antar bogie, yang masing-masing adalah 31186 kg; 9669 kg; 40855 kg; 7 m; dan 14 m

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Simulasi kereta penumpang SS-NG pada kecepatan kritis

Kecepatan kritis (*critical speed*) merupakan suatu kondisi dimana kereta sedang berada pada kecepatan maksimal. Saat kereta berada pada kecepatan kritis, kereta mengalami ketidakseimbangan (*hunting motion*). Hal ini karena roda menabrak bagian dalam rel secara kontinyu. Kondisi ini dapat dicapai dengan mensimulasikan kereta berada pada rel yang *irregular* atau dalam kondisi rusak (Polach, 2005) [13<sup>1</sup>]. Pada simulasi ini, *irregularity* rel ditetapkan 8 mm sehingga kondisi rel ini akan berperan sebagai *base excitation* yang akan mengeksitasi kereta dan menimbulkan respon getaran. Posisi *irregularity* rel diletakkan pada kedua rel yang berlokasi 50 m dari total panjang rel 1 Km sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 6.

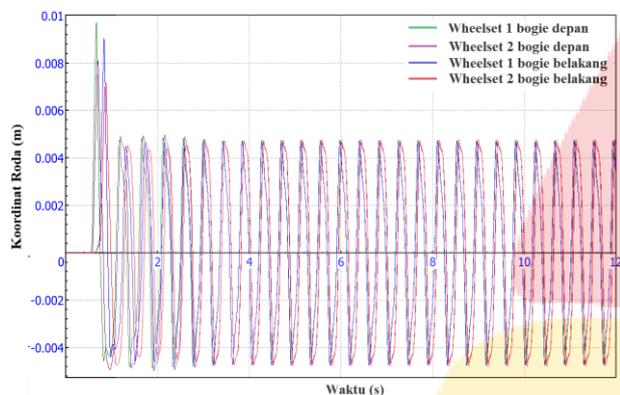


Gambar 6. Deskripsi *irregularitas* pada real untuk mencapai kecepatan kritis (*critical speed*)

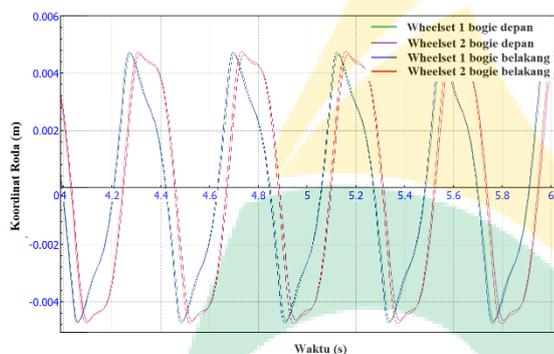
Kondisi dinamik kereta api saat berada pada kecepatan kritis ditampilkan pada Gambar 7. Pada simulasi ini, kereta beroperasi pada kecepatan 300 Km/jam, dengan kondisi lateral *damper* pada bogie masing-masing mempunyai kekakuan dan redaman sebesar  $4 \times 10^6$  N/m, dan  $6 \times 10^4$  N-s/m. Sedangkan kondisi *yaw damper* juga memiliki kekakuan dan redaman yang sama. Respon getaran akibat base eksitasi karena irregularitas rel secara penuh waktu ditampilkan pada Gambar 7(a). Sedangkan Gambar 7(b) menampilkan cuplikan respon getaran yang terjadi pada waktu 4 – 6 detik. Terlihat dari gambar ini bahwa, terdapat empat getaran yang terwakili oleh masing-masing warna. Keempat getaran tersebut menggambarkan defleksi sepasang *wheelset* depan dan sepasang *wheelset* belakang kereta api. Terlihat bahwa kereta mengalami *hunting motion* setelah melewati kondisi rel yang irregular yang terjadi saat waktu 0,6 detik yang menandakan kereta tidak stabil saat melewati gangguan dan sulit kembali dalam keadaan stabil. Osilasi getaran

<sup>1</sup> Polach O. (2005). On Non-Linear Methods of Bogie Stability Assessment Using Computer Simulations. Proc. IMechE, Vol. 220, 13-27.

tidak dapat meluruh seiring waktu dan dalam pandangan getaran mekanis, kereta sedang mengalami getaran paksa (*forced vibration*) dan *self-excited vibration*.



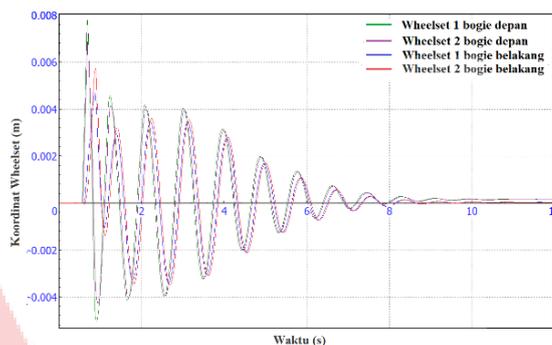
(a) Respon getaran akrobat base eksitasi karena irreguleritas rel secara penuh waktu ditampilkan



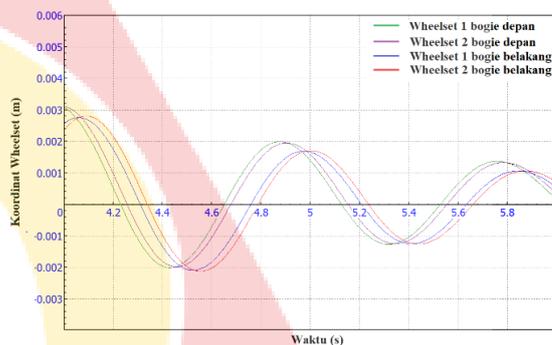
(b) cuplikan respon getaran yang terjadi saat waktu 4 – 6 detik

**Gambar 7.** Defleksi *wheelset* kereta SS-NG saat melewati kondisi rel irregular

Oleh karena itu, parameter redaman perlu ditingkatkan untuk mencapai stabilitas kereta api saat melewati kondisi rel yang buruk. sehingga lateral *dampers* dan *yaw dampers* pada bogie ditingkatkan menjadi  $4 \times 10^7$  N/m untuk kekakuan, dan  $1,5 \times 10^6$  N-s/m untuk redaman. Hasil simulasi setelah parameter redaman bogie ditingkatkan terlihat pada **Gambar 8**. Terlihat bahwa kereta tidak mengalami *hunting motion* setelah melewati kondisi rel yang irregular yang menandakan kereta lebih stabil saat melewati gangguan. Osilasi getaran meluruh setelah kereta melewati rel yang irregular. Dalam hal ini, kereta mengalami getaran bebas (*free vibration*).



(a) Respon getaran akrobat base eksitasi karena irreguleritas rel kereta secara penuh waktu ditampilkan



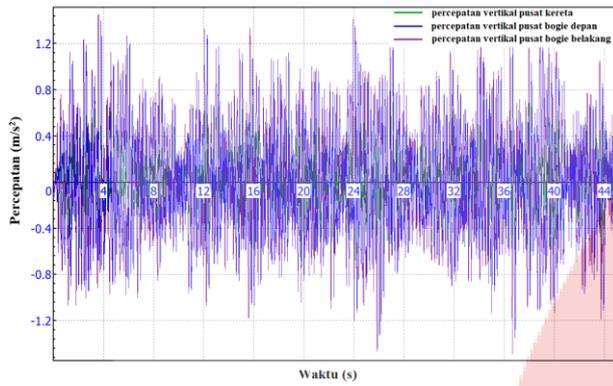
(b) cuplikan respon getaran yang terjadi pada waktu 4 – 6 detik

**Gambar 8.** Defleksi *wheelset* kereta SS-NG saat melewati kondisi rel irregular setelah lateral *dampers* dan *yaw dampers* pada bogie ditingkatkan.

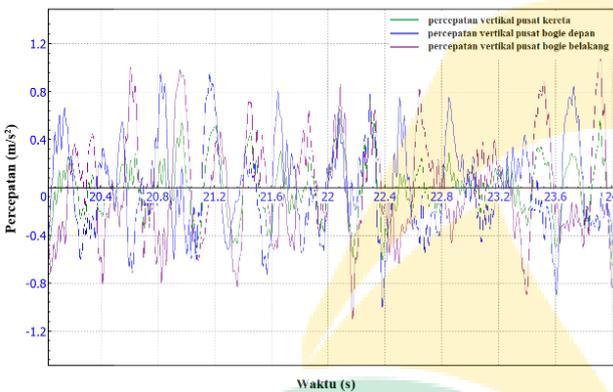
### 3.2 Simulasi Tingkat Kenyamanan Kereta Penumpang

#### 3.2.1. Simulasi Kereta Penumpang SS-NG

Simulasi ini menganalisis tingkat kenyamanan kereta SS-NG saat melintasi rel yang irregular dengan jarak tempuh 3 Km. *Irregularitas* rel terdapat pada kedua rel dengan arah vertikal dan lateral. Respon percepatan akan dianalisis pada arah lateral dan vertikal. Pada simulasi ini, kereta dioperasikan pada kecepatan 240 Km/jam. Hasil simulasi respon getaran arah vertikal ditunjukkan pada **Gambar 9**. Sedangkan respon getaran arah lateral ditunjukkan pada **Gambar 10**. Terlihat dari gambar tersebut bahwa sinyal berfluktuasi sepanjang waktu saat kereta melintasi rel irregular dan sinyal tersebut tidak meluruh. Hal ini karena lintasan rel yang irregular mengeksitasi struktur kereta dan berperan sebagai *external excited forces*. Amplitude getaran arah vertikal menunjukkan rata-rata  $1,2 \text{ m/s}^2$  dan amplitude getaran arah lateral menunjukkan rata-rata  $2 \text{ m/s}^2$ .

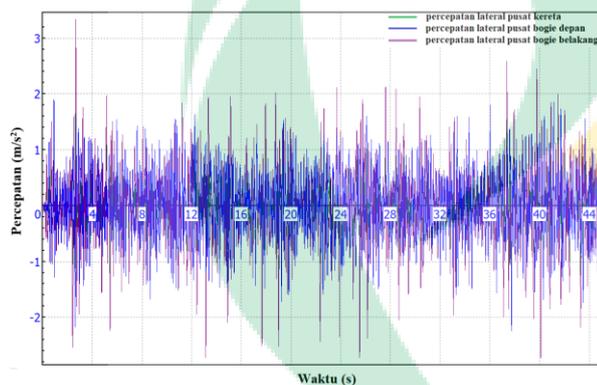


(a) sinyal getaran dengan waktu penuh



(b) cuplikan sinyal getaran pada waktu 20-24 detik

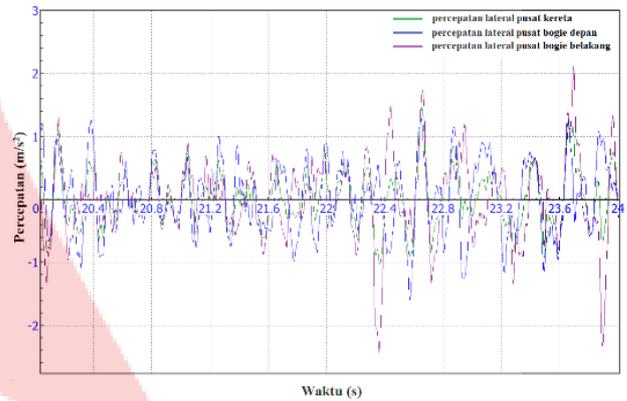
**Gambar 9.** Respon getaran arah vertikal saat kereta beroperasi pada rel irregular dengan kecepatan 240 Km/jam



(a) sinyal getaran dengan waktu penuh

Dengan menggunakan respon getaran tersebut, kemudian dapat dikonversi menjadi nilai kenyamanan berdasarkan metode Sperling sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (2)-(5). Berdasarkan respon getaran tersebut, tingkat kenyamanan kereta pada arah vertikal dan lateral ditampilkan pada Tabel 2 dan 3. Berdasarkan tabel tersebut, tingkat kenyamanan kereta SS-NG dapat diterima dengan baik. Hal ini karena kekakuan dan redaman lateral telah ditingkatkan sebagaimana pembahasan sebelumnya, yaitu masing-

masing ditingkatkan menjadi sebesar  $4 \times 10^7$  N/m untuk kekakuan, dan  $1,5 \times 10^6$  N-s/m untuk redaman.



(b) cuplikan sinyal getaran pada waktu 20-24 detik

**Gambar 10.** Respon getaran arah lateral saat kereta beroperasi pada rel irregular dengan kecepatan 240 Km/jam

**Tabel 2.** Tingkat kenyamanan kereta arah vertikal berdasarkan indeks sperling

Koordinat	Indeks Sperling	Ride Quality
<i>az_center carbody</i>	1,83	<i>Very Good</i>
<i>az_front center bogie</i>	2,09	<i>Good</i>
<i>az_rear center bogie</i>	2,01	<i>Good</i>

**Tabel 3.** Tingkat kenyamanan kereta arah lateral berdasarkan indeks sperling

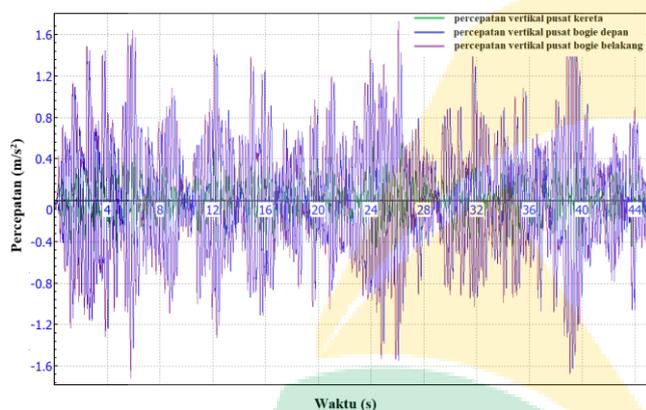
Koordinat	Indeks Sperling	Ride Quality
<i>ay_center carbody</i>	2,18	<i>Good</i>
<i>ay_front center bogie</i>	2,47	<i>Tolerable</i>
<i>ay_rear center bogie</i>	2,28	<i>Tolerable</i>

### 3.2.2. Simulasi Kereta Penumpang SS-2018

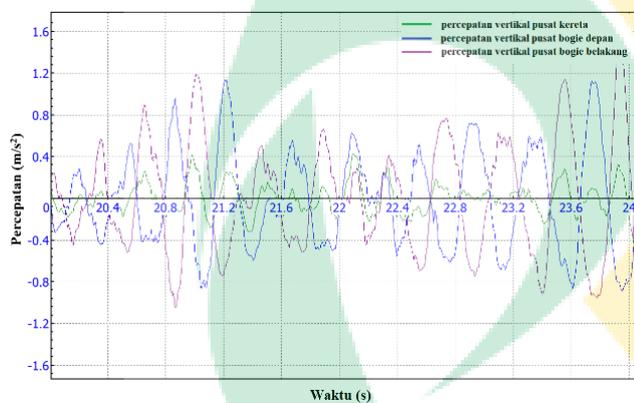
Sebagai perbandingan, berikut ini akan disimulasikan tingkat kenyamanan kereta penumpang SS-2018 saat melintasi rel yang irregular dengan jarak tempuh 3 Km. kondisi *irregularitas* rel adalah sama seperti simulasi pada SS-NG, yaitu terdapat pada kedua rel dengan arah vertikal dan lateral, serta kereta juga dioperasikan pada kecepatan 240 Km/jam. Hasil simulasi respon getaran arah vertikal ditunjukkan pada **Gambar 11**. Sedangkan respon getaran arah lateral ditunjukkan pada **Gambar 12**. Terlihat dari gambar tersebut bahwa getaran juga berfluktuasi sepanjang waktu saat kereta melintasi rel irregular karena lintasan rel yang irregular mengeksitasi struktur kereta. Terlihat bahwa kereta penumpang SS-2018 lebih tidak stabil

dibandingkan kereta penumpang SS-NG yang dibuktikan dengan amplitude getaran arah vertikal sedikit lebih besar, yaitu rata-rata  $1,6 \text{ m/s}^2$  dan demikian juga amplitude getaran arah lateral cukup lebih besar dibanding respon getaran lateral yang dihasilkan oleh kereta SS-NG, yaitu rata-rata  $3 \text{ m/s}^2$ . Berdasarkan respon getaran tersebut, tingkat kenyamanan ditabulasi pada Tabel 4 dan 5.

Berdasarkan hasil tersebut, kereta penumpang ini performanya lebih buruk dalam segi kenyamanan pada arah vertikal dan lateral, dan tidak dapat berjalan dikecepatan 240 Km/jam karena *Sperling comfort indeks* sudah melebihi batas yaitu 2,5 pada arah lateral.

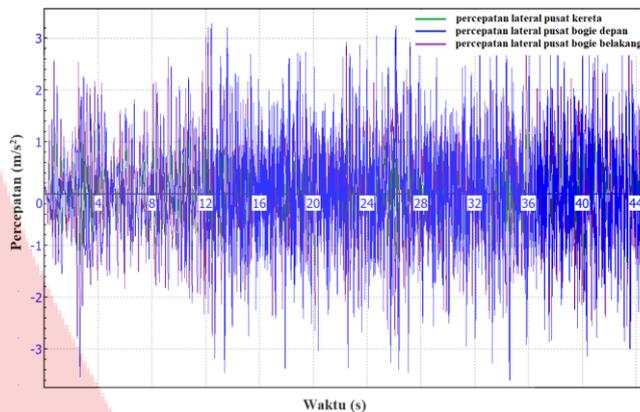


(a) sinyal getaran dengan waktu penuh

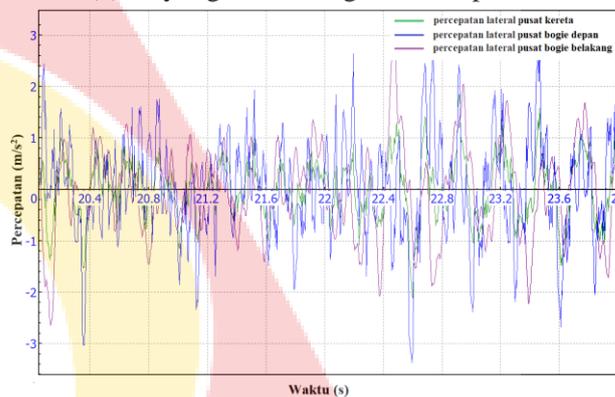


(b) cuplikan sinyal getaran pada waktu 20-24 detik

**Gambar 11.** Respon getaran arah vertikal saat kereta beroperasi pada rel irregular dengan kecepatan 240 Km/jam



(a) sinyal getaran dengan waktu penuh



(b) cuplikan sinyal getaran pada waktu 20-24 detik  
**Gambar 12.** Respon getaran arah lateral saat kereta beroperasi pada rel irregular dengan kecepatan 240 Km/jam.

**Tabel 4.** Tingkat kenyamanan kereta arah vertikal berdasarkan indeks sperling untuk kereta penumpang SS-2018

Koordinat	Sperling Indeks	Ride Quality
az_center carbody	1,57	Very Good
az_front center bogie	2,28	Tolerable
az_rear center bogie	2,22	Tolerable

**Tabel 5.** Tingkat kenyamanan kereta arah lateral berdasarkan indeks sperling untuk kereta penumpang SS-2018

Koordinat	Sperling Indeks	Ride Quality
ay_center carbody	2,37	Tolerable
ay_front center bogie	2,67	Bad
ay_rear center bogie	2,63	Bad

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

### 4.1 Kesimpulan

Artikel ini membahas tentang simulasi kereta penumpang SS-NG yang sedang dikembangkan dan akan difabrikasi oleh PT. INKA sebagai produsen kereta nasional Indonesia. Kereta SS-NG merupakan inovasi baru dari kereta penumpang *stainless steel* versi lama, SS-2018. Beberapa poin penting hasil simulasi dirangkum sebagai berikut;

1. Desain bogie pada kereta penumpang SS-NG tidak stabil pada kecepatan 300 Km/jam saat melewati rel yang mengalami kerusakan. Kereta mengalami *hunting motion* dan osilasi getaran tidak meluruh seiring waktu.
2. Setelah kekakuan dan redaman bogie ditingkatkan, kereta penumpang SS-NG menjadi stabil meskipun beroperasi pada kecepatan 300 Km/jam. *Hunting motion* dan osilasi getaran dapat teredam setelah 8 detik melewati rel yang rusak.
3. Model bogie SS-NG memiliki tingkat kenyamanan yang dapat diterima dengan baik saat melintasi rel dengan kecepatan 240 Km/jam berdasarkan indeks sperling dengan amplitude getaran yang lebih rendah.
4. Model bogie SS-2018 memiliki tingkat kenyamanan yang buruk berdasarkan indeks sperling saat melintasi rel dengan kecepatan 240 Km/jam dan memiliki amplitude getaran yang lebih tinggi

### 4.2 Saran

1. Menggunakan *super computer* agar hasil simulasi lebih presisi, sehingga tidak perlu khawatir dengan hasil simulasi akan eror. Dengan begitu proses validasi data simulasi dan prototipe bisa diminimalisir agar menghemat waktu.
2. Pada penelitian ini simulasi masih berdasarkan aspek numerik sehingga tidak mempertimbangkan ketersediaan komponen, namun spesifikasi komponen yang digunakan sudah mendekati komponen yang ada, untuk selanjutnya penelitian ini bisa dikembangkan dengan menggunakan komponen-komponen yang tersedia.

## REFERENSI

- [1] Andersson, E., Berg, M., & Stichel, S. (2014). Rail Vehicle Dynamics. Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan.
- [2] Dizo, J., & Blatnický, M. (2016). Use Of Multibody System Dynamics As A Tool For Rail Vehicle Behaviour Diagnostics. PTDT, Vol.17 No.2, 9-16.

- [3] Dizo, J., Blatnický, M., & Skocilasova, B. (2015). Computational Modelling of the Rail Vehicle Multibody system of a rail vehicle bogie with a flexible body. Communications, 31-36.
- [4] European Standard 14363, Railway Application – testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – running behavior and stationary test, 2019
- [5] Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2019). Simulation Of Safety Against Derailment Tests of An Electric Locomotive. 25th International Conferences (pp. 177-180). Svratka: Engineering Mechanics 2019.
- [6] Keskin, K., & Karamancioglu, A. (2017). Train Motion Dynamic Model Choices. International Symposium on Electrical Railway Transportation Systems (pp. 27-29). Eskisehir: Research Gate.
- [7] Liu, X., Saat, M. R., & Barkan, C. P. (2012). Analysis of Causes of Major Train Derailment and Their Effect on Accident Rates. Transportation Research Board, Vol.1 No.2289, 154-163.
- [8] Mihai, L., & Dumitriu, M. (2018). Correction Between Ride Comfort Indeks and Sperling's Index for Evaluation Ride Comfort in Railway Vehicles. Trans Tech Publications, Vol. 880, 201-206.
- [9] Polach O. (2005). On Non-Linear Methods of Bogie Stability Assessment Using Computer Simulations. Proc. IMechE, Vol. 220, 13-27.
- [10] Logawa, H. (2020, 8 31). review-ka-mengenal-kereta-penumpang hudalogawa.blogspot.com:http://hudalogawa.blogspot.com/2020/08/review-ka-mengenal-kereta-penumpang.html . Diakses pada November, 2021.
- [11] Iwnicki, S. (2006). Handbook of Railway Vehicle Dynamic 1st Edition. Paris: Taylor & Francis Group.
- [12] M.Lestari (2013). Pengaruh getaran terhadap penumpang kereta berdasarkan sperling's ride index. Repository UI