

Analisis Respon Vibrasi Roda-Rel Arah Lateral sebagai Langkah Pengendalian Kebisingan Derit LRT Palembang pada Tikungan Bandara Sultan Mahmud Badaruddin II

Muhammad Bintang Tsaqib, Wiratno Argo Asmoro
Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
e-mail: bintang5th@gmail.com, wiratno@ep.its.ac.id

Abstract— LRT merupakan salah satu moda transportasi massal yang murah, efisien dan dapat mengatasi kemacetan yang ada di Palembang. Lintasan LRT memiliki beberapa tikungan. Akan tetapi, saat LRT melalui tikungan bandara terjadi gaya kontak antara roda-rel yang menyebabkan vibrasi arah lateral dan menyebabkan timbulnya kebisingan derit. Kebisingan derit terjadi pada frekuensi dimana telinga manusia sensitif. Untuk itu dilakukan analisis mengenai karakteristik bising derit beserta karakteristik dinamik roda sebagai penyebab kebisingan derit serta langkah yang direkomendasikan untuk mengurangi kebisingan derit. Karakteristik bising derit LRT saat melalui tikungan bandara memiliki frekuensi dominan pada rentang frekuensi 842 Hz, 2844 Hz, 3709 Hz, dan 4675 Hz dengan nilai TTB ekuivalen dari kebisingan derit sebesar 94,93 dBA. Karakteristik dinamik roda memiliki lima nilai frekuensi natural yang berpengaruh terhadap terjadinya derit yaitu pada frekuensi 965,34 Hz; 2989,5 Hz; 3977,4 Hz; dan 4722,4 Hz. Langkah pengendalian bising derit dapat dilakukan dengan memberikan rekomendasi kecepatan maksimum 13 km/jam untuk kondisi penumpang penuh dan kecepatan maksimum 14 km/jam untuk kondisi penumpang normal. Selain itu langkah pengendalian bising derit juga dapat dilakukan penambahan koefisien kekakuan dan redaman. Untuk LRT dengan kecepatan 20 km/jam diberikan rekomendasi penambahan koefisien kekakuan sebesar 10% dan penambahan koefisien redaman sebesar 280%. Untuk LRT dengan kecepatan 15 km/jam diberikan rekomendasi penambahan koefisien redaman sebesar 200%. Kedepannya untuk menghindari derit jari-jari tikungan minimum yang direkomendasikan adalah 205 m.

Kata Kunci—Bising Derit, Frekuensi Natural, Kecepatan Maksimum, Koefisien Kekakuan, Koefisien Redaman.

I. PENDAHULUAN

LRT Palembang adalah sebuah sistem angkutan cepat dengan model lintas rel terpadu yang dibangun di Palembang, Sumatera Selatan yang menghubungkan Bandar Udara Internasional Sultan Mahmud Badaruddin II dengan Kompleks Olahraga Jakabaring. Pembangunan LRT difungsikan sebagai sarana transportasi penunjang warga Palembang dan sekitarnya, termasuk untuk menunjang mobilitas penonton dan atlet pada Asian Games 2018.

Permasalahan yang timbul saat kereta dalam hal ini LRT melalui lintasan berbentuk belokan adalah menghasilkan suara bising dengan tingkat tekanan bunyi yang tinggi pada frekuensi sensitif pendengaran manusia yang dinamakan dengan derit. Permasalahan ini juga terjadi pada kereta barang yang melewati tikungan tajam di Australia khususnya di wilayah metropolitan. Suara derit merupakan suara dengan pitch tinggi yang terjadi saat kereta melewati belokan ataupun pergantian jalur dari suatu lintasan kereta api. Suara ini terjadi pada rentang frekuensi dimana telinga manusia paling sensitif sehingga sangat mengganggu penumpang ataupun penduduk

sekitar dan memiliki tingkat kebisingan 20 dB lebih besar dari kebisingan kereta yang bergerak lurus [1].

Penanganan kebisingan pada sumbernya dapat lebih atraktif dibandingkan penggunaan penghalang bising, namun hal ini membutuhkan pemahaman menyeluruh tentang mekanisme sumber tersebut dalam menghasilkan kebisingan serta metode untuk mengevaluasi keefektifan solusi yang diusulkan [2]. Roda adalah salah satu komponen yang paling berpengaruh pada kebisingan kereta api yang dapat menghasilkan beberapa jenis bising seperti rolling noise, impact noise atau squeal noise [3].

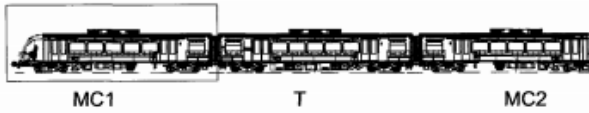
David Thompson dalam bukunya “Railway Noise and Vibration” menyatakan bahwa bising derit muncul akibat mekanisme kontak antara roda dan rel yang tidak stabil saat kereta melalui tikungan. Bising derit umumnya muncul pada frekuensi antara 250 Hz dan 5 kHz. Ada banyak cara untuk mengurangi kebisingan derit yang dihasilkan roda-rel salah satunya adalah dengan menambahkan peredam pada roda [4]. Kemudian cara lainnya adalah dengan menambahkan peredam pada rel, melumasi rel dengan cairan tertentu, dan merubah profil bogie[5].

Kebisingan derit juga terjadi akibat besarnya gaya kontak pada arah lateral antara roda dan rel yang mengakibatkan besarnya vibrasi pada arah lateral. Pada penelitian sebelumnya oleh X. Liu dan P. A. Meehan telah dilakukan upaya mitigasi kebisingan derit yaitu dengan memberikan rekomendasi parameter untuk menurunkan kebisingan derit sebesar 6 dB atau setara dengan menurunkan amplitudo vibrasi berupa kecepatan arah lateral sebesar 50%. Untuk itu pada penelitian ini akan dilakukan analisis karakteristik bising derit LRT dan karakteristik dinamik roda LRT serta parameter yang dibutuhkan untuk menurunkan respon vibrasi arah lateral sebesar 50% [6].

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Kebisingan

Kebisingan adalah bunyi yang tidak diinginkan dari suatu usaha atau kegiatan dalam tingkat dan waktu tertentu yang dapat menimbulkan gangguan kesehatan manusia dan kenyamanan lingkungan, termasuk ternak, satwa, dan sistem alam. Suara yang bersumber dari alat-alat kerja yang pada tingkat tertentu dapat menimbulkan gangguan pendengaran. [7].



Gambar 1. Susunan gerbong LRT Palembang

B. Kebisingan Derit

Bising derit belokan merupakan bunyi yang keras dan bersifat mengganggu yang bersumber dari rel kereta api, karakteristiknya adalah memiliki bunyi dominan pada salah satu atau beberapa frekuensi dengan rentang 250 hz hingga 5 khz. Derit dihasilkan dari gaya kontak lateral antara roda dan rel saat kereta melalui lintasan berbentuk lingkungan dan terjadi semakin besar saat jari-jari tikungan semakin kecil[8].

C. LRT Palembang

LRT Palembang merupakan moda transportasi masal yang memiliki 3 gerbong dengan susunan MC1-T-MC2. MC (*Motor Car*) merupakan gerbong yang memiliki motor pada bagian bogie yang berfungsi untuk menggerakkan seluruh rangkaian LRT.

Lintasan LRT Palembang membentang sepanjang 23,4 km dan memiliki beberapa tikungan. Tikungan dengan jari-jari paling kecil adalah tikungan bandara dengan jari-jari 78 m.

D. Bogie

Bogie adalah suatu konstruksi yang terdiri dari dua perangkat roda atau lebih yang digabungkan oleh rangka yang dilengkapi dengan sistem pemegasan, pengereman, dan dengan atau tanpa peralatan penggerak serta berfungsi sebagai pendukung rangka dasar dari badan kereta [9].

E. Frekuensi Natural

Frekuensi natural adalah bagian dari karakteristik dinamik suatu bahan atau struktur. Frekuensi natural dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan teoritis. Persamaan untuk mencari frekuensi natural dari tiap-tiap moda bergantung pada kondisi batas yang ditetapkan [10]. Untuk circular flat plate yang memiliki kondisi batas free pada setiap ujung-ujungnya, persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$fn = \frac{Kn}{2\pi} \sqrt{\frac{Dg}{wr^4}} \tag{1}$$

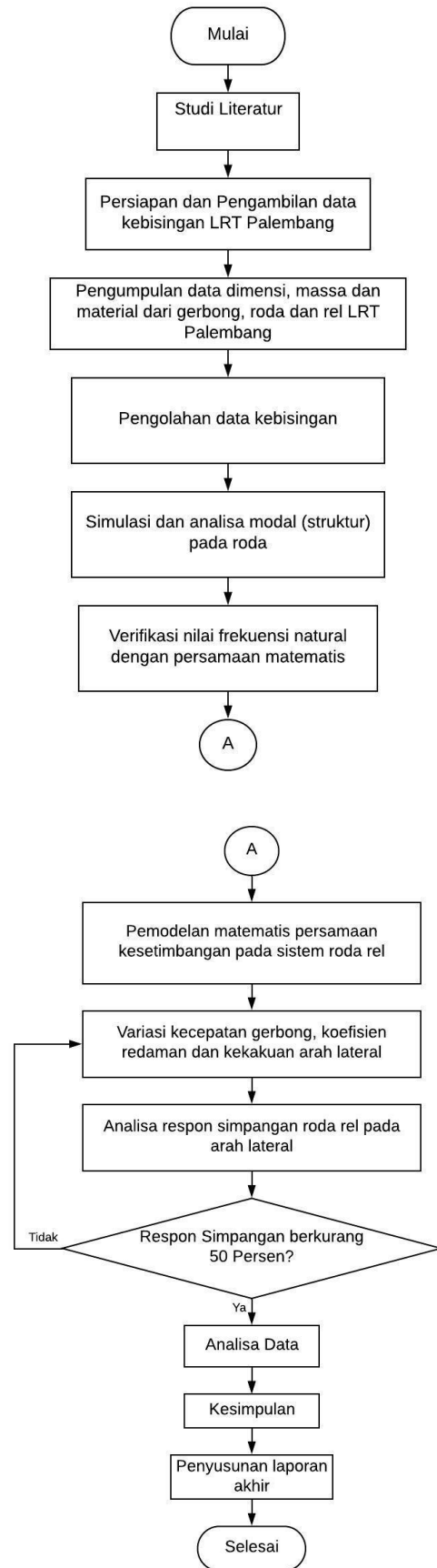
$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \tag{2}$$

Dimana:

- fn = Frekuensi natural (Hz)
- Kn = Konstanta pada moda ke-n
- g = Percepatan gravitasi (m/s²)
- w = Beban per unit area (N/m²)
- r = Jari-jari roda (m)
- E = Modulus Young (N/m²)
- t = Ketebalan (m)
- v = Poisson Ratio

F. Getaran

Getaran merupakan gerakan berulang-ulang yang melalui titik keseimbangan secara kontinu [13]. Roda dapat didefinisikan kedalam bentuk massa-kekakuan-redaman yang setimbang dengan gaya sentrifugal yang diakibatkan



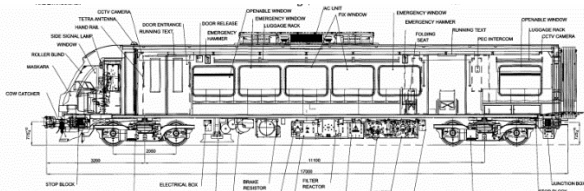
Gambar 2. Diagram alir tugas akhir

oleh kereta dengan massa dan kecepatan tertentu yang melalui lintasan berbentuk tikungan dengan jari-jari tertentu. Berikut adalah persamaan kesetimbangan sistem roda rel:

$$m \cdot x''(t) + cl \cdot x'(t) + kl \cdot x(t) = Fs(t) \tag{3}$$



Gambar 3 Skema pengambilan data tampak atas



Gambar 4 Dimensi gerbong LRT MC

$$F_s = \frac{mb.v^2}{r} \tag{4}$$

Dimana:

- m = Massa yang bertumpu pada satu roda (Kg)
- cl = Koefisien redaman pada arah lateral (Ns/m)
- kl = Kekakuan pada arah lateral (N/m)
- Fs = Gaya Sentrifugal (N)
- mb = Massa untuk satu gerbong (Kg)
- v = Kecepatan LRT (m/s)
- r = Jari-jari tikungan (m)

III. METODE PENELITIAN

Pada bahasan ini akan dijelaskan mengenai langkah-langkah pengerjaan dalam penelitian ini yang secara umum terdiri dari tiga pekerjaan yaitu analisis kebisingan derit, analisis karakteristik dinamik roda dan analisis respon vibrasi arah lateral. Berikut diagram alir ditunjukkan pada Gambar 2.

A. Persiapan Pengambilan Data

Persiapan merupakan tahap yang harus dilakukan sebelum pengambilan data. Pengambilan data kebisingan derit dilakukan di lintasan LRT Palembang tepatnya pada tikungan bandara sultan mahmud badaruddin II.

B. Pengolahan Data Kebisingan LRT Palembang

Hasil pengambilan data yang didapatkan yaitu berupa spektrum suara diolah dengan menggunakan software Matlab dan Microsoft Excel. Untuk data .wav file tersebut di plot ke dalam domain frekuensi dengan FFT dan data yang didapatkan dari SLM diplot ke dalam bentuk domain frekuensi untuk mengetahui tingkat kebisingan ekuivalen derit pada tikungan bandara.

C. Pengumpulan Data Dimensi, Massa dan Spesifikasi dari Gerbong, Roda, dan Rel LRT Palembang

Pengambilan data dilakukan pada PT INKA yang berlokasi di Madiun, Jawa Timur. Gerbong LRT Palembang memiliki susunan MC1-T-MC2.

Pada gerbong LRT menggunakan bogie dengan jenis TB1067. Berikut adalah parameter dinamik LRT Palembang yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1.
Parameter dinamik LRT Palembang

Variabel	Keterangan	Nilai
M1	Massa gerbong tanpa penumpang	31083 kg
M2	Massa gerbong dengan penumpang normal	38808 kg
M3	Massa gerbong dengan penumpang penuh	43608 kg
C	Koefisien redaman arah lateral	27400 N.s.m ⁻¹
K	Koefisien kekakuan arah lateral	4000000 N.m ⁻¹
R	Jari-jari tikungan bandara	78 m
S	Panjang lintasan belokan	117 m
V	Kecepatan kereta kondisi awal hasil pengamatan	20 km/jam

D. Analisis Frekuensi Natural dari Roda sebagai Penyebab Kebisingan Derit

Frekuensi natural dapat dikalkulasi dengan menggunakan simulasi dengan perangkat lunak ANSYS 17.1 tepatnya pada Analisis Modal. Setiap benda memiliki bentuk-bentuk tertentu dan setiap bentuk memiliki moda (arah). Roda pada kereta api berbentuk lingkaran dengan jari-jari dan ketebalan tertentu.

E. Verifikasi Nilai Frekuensi Natural dengan Persamaan Matematis

Setelah didapatkan nilai frekuensi natural dengan menggunakan simulasi perlu dilakukan verifikasi nilai dengan persamaan (1) dan (2).

F. Pemodelan Matematis Persamaan Kesetimbangan pada Sistem Roda Rel

Saat kereta melintasi rel yang berbentuk tikungan maka akan terjadi gaya sentrifugal pada bagian roda dan rel. Gaya sentrifugal ini menghasilkan gesekan dalam arah lateral antara roda dan rel sehingga kemudian jika gesekan dalam bentuk vibrasi ini terjadi secara terus menerus akan menyebabkan terjadinya derit.

G. Analisis Respon Vibrasi Roda Rel pada Arah Lateral

Pada penelitian sebelumnya oleh X.Liu dan P.A.Meehan telah dilakukan rekomendasi bahwa untuk menghilangkan derit bisa dilakukan dengan menurunkan tingkat kebisingan sebesar 6 dB atau mengurangi respon vibrasi berupa kecepatan pada arah lateral sebesar 50%. Untuk itu ditetapkan target respon vibrasi maksimum untuk pengendalian kebisingan derit adalah 50% dari kondisi aktual. Jika respon vibrasi melebihi 50% acuan maka perlu dilakukan perubahan parameter sebagai langkah pengendalian bising.

IV. ANALISIS DATA DAN PEMBAHAN

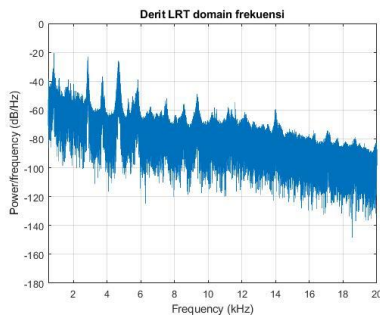
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil data yang telah diperoleh berdasarkan metodologi penelitian pada bab sebelumnya.

A. Analisis Data

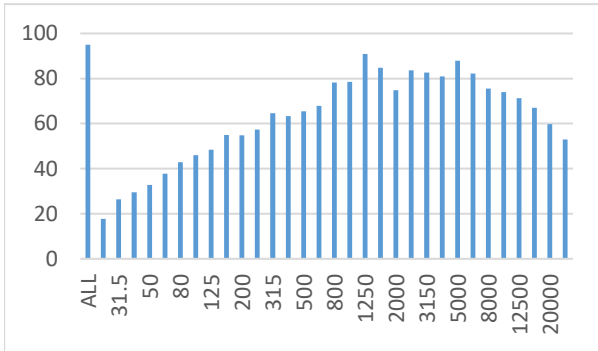
Berikut adalah rincian penjelasan dari hasil dan data yang didapatkan:

1) Analisis Kebisingan Derit LRT Palembang

Berdasarkan pengukuran karakteristik bising LRT didapatkan karakteristik yang akan ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Karakteristik kebisingan derit LRT Palembang



Gambar 6. Karakteristik kebisingan derit LRT Palembang dengan menggunakan alat ukur SLM SL-130

Tabel 2.

Nilai frekuensi natural dan moda roda LRT

No	Moda	Frekuensi Natural (Hz)
1	1,2	965,34
2	4,0	3977,4
3	5,1	2989,5
4	5,3	4722,4

Tabel 3.

Perbandingan frekuensi derit dengan frekuensi natural roda LRT

No	Frekuensi Derit (Hz)	Frekuensi Natural Roda (Hz)
1	842	965,34
3	2844	2989,5
4	3709	3977,4
5	4675	4722,4

Kemudian juga dilakukan pengukuran kebisingan derit dengan menggunakan SLM Dekko tipe SL-130 dengan menggunakan perangkat lunak RTA. Berikut adalah hasil pengukuran kebisingan derit dengan menggunakan perangkat lunak RTA yang ditampilkan pada Gambar 6.

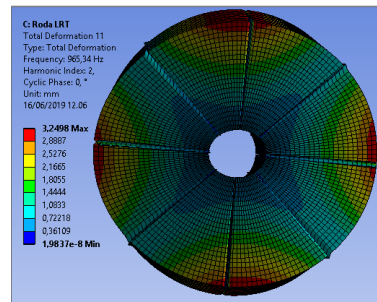
Dari pengambilan data TTB pada tikungan bandara LRT Palembang didapatkan nilai TTB ekuivalen berada pada nilai 94,93 dB dengan karakteristik puncak dominan pada frekuensi 842 Hz, 2844 Hz, 3709 Hz, dan 4675 Hz.

2) Analisis Karakteristik Dinamik Roda LRT dengan ANSYS

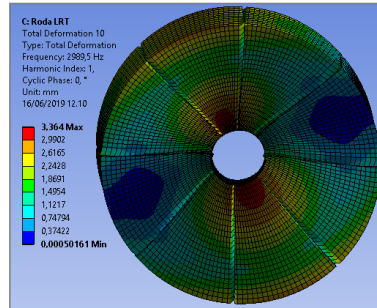
Karakteristik dinamik dari roda diketahui dari nilai frekuensi natural beserta dengan moda atau arah getarnya. Berikut adalah nilai frekuensi natural yang didapatkan dari simulasi perangkat lunak ANSYS 17.1 yang ditampilkan pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil simulasi dari frekuensi natural diambil lima nilai frekuensi natural yang menjadi penyebab terjadinya derit. Berikut adalah perbandingan nilai frekuensi derit dengan nilai frekuensi natural roda yang berpengaruh terhadap terjadinya derit, ditampilkan dalam Tabel 3.

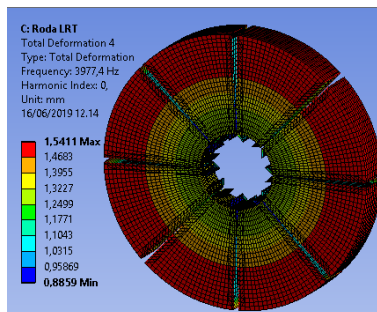
Kemudian ditampilkan pada Gambar 7., Gambar 8., Gambar 9., dan Gambar 10. mengenai moda beserta bentuk



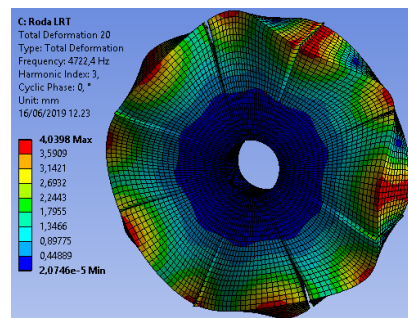
Gambar 7. Frekuensi natural 965,34 Hz



Gambar 8. Frekuensi natural 2989,5 Hz



Gambar 9. Frekuensi natural 3977,4 Hz



Gambar 10. Frekuensi natural 4722,4 Hz

dari frekuensi natural roda yang berpengaruh terhadap terjadinya derit.

3) Verifikasi Nilai Frekuensi Natural dengan Persamaan Matematis

Nilai frekuensi natural yang didapatkan dari simulasi ANSYS selanjutnya dilakukan verifikasi dengan menggunakan persamaan matematis. Berikut adalah nilai Frekuensi natural yang didapatkan, ditampilkan dalam Tabel 4.

4) Perbandingan Frekuensi Derit dan Frekuensi Natural

Pada simulasi ANSYS didapatkan 25 nilai frekuensi natural beserta modanya sementara pada persamaan matematis didapatkan 4 nilai frekuensi natural dan modanya. Pada Tabel 5 akan ditampilkan perbandingan nilai frekuensi natural hasil simulasi dengan hasil persamaan analitik.

Berdasarkan hasil verifikasi antara frekuensi natural

Tabel 4.
Frekuensi natural berdasarkan persamaan matematis

No	Frekuensi Natural (Hz)
1	1536,2
2	2656,8
3	3569,7
4	5998,3

Tabel 5.
Perbandingan frekuensi natural simulasi dengan frekuensi natural persamaan matematis

No	Fn Simulasi (Hz)	Fn Persamaan Matematis (Hz)	Error (%)
1	965,34	-	-
2	2989,5	2656,8	12,52
3	3977,4	3569,7	11,42
4	4722,4	-	-

Tabel 6.
Perbandingan Frekuensi Derit dengan Frekuensi Natural Roda Simulasi dan Persamaan

No	Frekuensi Derit (Hz)	Fn Simulasi (Hz)	Fn Persamaan Matematis (Hz)
1	842	965,34	-
2	2844	2989,5	2656,8
3	3709	3977,4	3569,7
4	4675	4722,4	-

simulasi dengan persamaan matematis untuk frekuensi natural simulasi yang berpengaruh terhadap derit pada nilai pertama, 965,34 Hz dan nilai keempat, 4722,4 Hz tidak tersedia nilai perbandingan pada frekuensi natural persamaan matematis karena nilai konstanta yang terbatas. Berikut adalah perbandingan antara frekuensi dominan dari derit, frekuensi natural dari simulasi dan frekuensi natural dari persamaan matematis yang tercantum dalam Tabel 6.

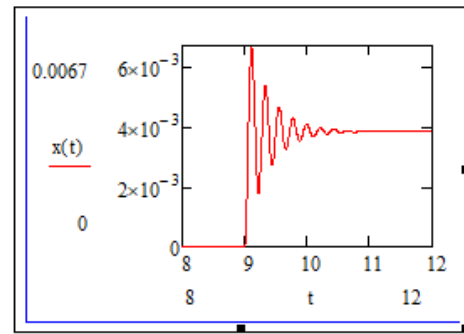
5) Analisis Respon Vibrasi Arah Lateral pada Sistem Roda Rel Berdasarkan Pemodelan Persamaan Kesetimbangan

Kebisingan derit pada LRT Palembang terjadi selain karena nilai frekuensi natural roda yang dekat dengan frekuensi derit juga karena besarnya vibrasi arah lateral yang diakibatkan oleh gaya kontak antara roda dan rel saat melalui belokan. Untuk itu dilakukan pemodelan dengan memasukan parameter yang telah diketahui kedalam persamaan kesetimbangan untuk mengetahui respon vibrasi arah lateral. Kemudian dilakukan variasi untuk keadaan kereta penuh dan normal, variasi kecepatan gerbong, serta variasi koefisien redaman dan kekakuan.

a) Hasil Simulasi Respon Vibrasi pada Sistem Roda Rel dengan Keadaan Awal

Simulasi ini dilakukan dengan objek analisis pada gerbong MC dengan kecepatan 20 km/jam. Kecepatan 20 km/jam berasal dari pengamatan tim LRT Palembang saat melakukan pengukuran kebisingan derit pada tikungan bandara yang dimana pada kecepatan tersebut TTB ekuivalen yang dihasilkan adalah 94,93 dB. Berikut adalah hasil simulasi respon vibrasi pada arah lateral untuk kondisi awal yang ditampilkan pada Gambar 11.

Pada LRT dengan kondisi penumpang normal dihasilkan vibrasi maksimum 0,105 m/s. Maka dari itu yang dijadikan acuan adalah LRT dengan kondisi penumpang normal yang menghasilkan vibrasi maksimum sebesar 0,105 m/s. Sehingga ditetapkan target acuan pengurangan amplitudo 50% atau 0,0525 m/s.



Gambar 11. Respon vibrasi roda arah lateral dengan kondisi awal

Tabel 7.
Respon vibrasi maksimum dengan kondisi penumpang penuh dan variasi kecepatan

Kecepatan (km/jam)	Respon Vibrasi Maksimum (m/s)	Penurunan
10	0,029	-72,38%
11	0,036	-65,71%
12	0,042	-60,00%
13	0,05	-52,38%
14	0,058	-44,76%
15	0,066	-37,14%
16	0,075	-28,57%
17	0,085	-19,05%
18	0,095	-9,52%
19	0,106	+0,95%

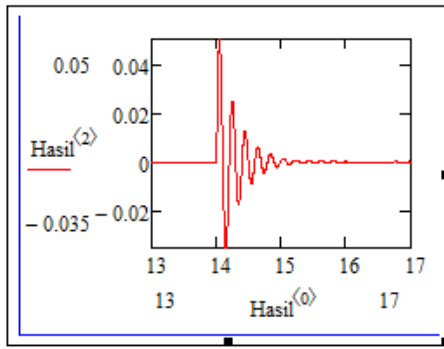
Tabel 8.
Respon vibrasi maksimum dengan kondisi penumpang penuh dan variasi kecepatan

Kecepatan (km/jam)	Respon Vibrasi Maksimum (m/s)	Penurunan
10	0,026	-75,24%
11	0,032	-69,52%
12	0,038	-63,81%
13	0,044	-58,10%
14	0,051	-51,43%
15	0,059	-43,81%
16	0,067	-36,19%
17	0,076	-27,62%
18	0,085	-19,05%
19	0,095	-9,52%

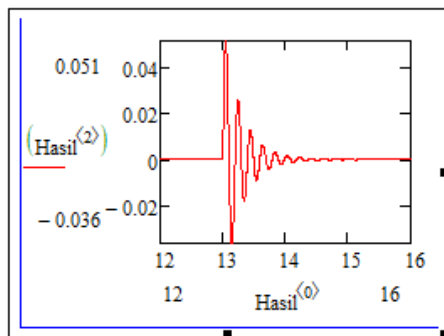
b) Hasil Simulasi Respon Vibrasi dengan Variasi Kecepatan dan Kapasitas Penumpang

Pada langkah ini dilakukan simulasi untuk mendapatkan respon vibrasi arah lateral saat roda melalui tikungan bandara. Pada langkah ini dilakukan variasi untuk kecepatan gerbong dan kapasitas penumpang LRT. Variasi kecepatan gerbong dilakukan dengan kecepatan 10 km/jam; 11 km/jam; 12 km/jam; 13 km/jam; 14 km/jam, 15 km/jam, 16 km/jam, 17 km/jam, 18 km/jam dan 19 km/jam. Sementara untuk kapasitas penumpang LRT dilakukan variasi penumpang dengan kapasitas normal dan penumpang dengan kapasitas penuh. Berikut adalah hasil simulasi respon vibrasi arah lateral pada LRT dengan variasi kecepatan dan kondisi penumpang penuh.

Pada kondisi penumpang penuh dilakukan simulasi dan didapatkan hasil penurunan yang melebihi target 50% yaitu pada kecepatan 13 km/jam dengan penurunan 52,38% dari target acuan. Berikut hasil simulasi respon vibrasi arah lateral pada LRT dengan variasi kecepatan dan kondisi penumpang normal.



Gambar 12. Respon vibrasi arah lateral kondisi penumpang penuh dan kecepatan 13 km/jam



Gambar 13. Respon vibrasi arah lateral kondisi penumpang normal dan kecepatan 14 km/jam

Tabel 9.

Respon vibrasi maksimum dengan kecepatan 20 km/jam dan k tetap

Variasi Redaman	Respon Vibrasi Maksimum (m/s)	Penurunan Vibrasi
Penambahan 50%	0,109	+3,81%
Penambahan 100%	0,102	-2,86%
Penambahan 150%	0,096	-8,57%
Penambahan 200%	0,09	-14,29%
Penambahan 280%	0,082	-21,90%

Pada kondisi penumpang normal dilakukan simulasi dan didapatkan hasil penurunan yang melebihi target 50% yaitu pada kecepatan 14 km/jam dengan penurunan 51,43% dari target acuan. Berikut hasil simulasi respon vibrasi arah lateral pada LRT dengan variasi kecepatan dan kondisi penumpang normal. Berikut adalah hasil simulasi respon vibrasi lateral dengan kondisi penumpang penuh pada kecepatan 13 km/jam dan kondisi penumpang normal pada kecepatan 14 km/jam.

c) Hasil Simulasi Respon Vibrasi pada Sistem Roda Rel dengan Variasi Kecepatan Gerbong, Koefisien Kekakuan dan Redaman

Pada langkah ini dilakukan simulasi untuk mendapatkan respon vibrasi arah lateral saat roda melalui tikungan bandara. Untuk kondisi penumpang ditentukan LRT berada pada kondisi penumpang penuh dilakukan dengan variasi kecepatan 20 km/jam dan kecepatan 15 km/jam. Variasi parameter suspensi yang dilakukan adalah dengan penambahan nilai koefisien redaman dan kekakuan. Penambahan nilai kekakuan dilakukan dengan acuan batas toleransi penambahan maksimal 10% sesuai dengan acuan dari PT INKA. Penambahan nilai redaman dilakukan dengan acuan pada penelitian sebelumnya oleh X.Liu yang melakukan penambahan koefisien redaman hingga 280%.

Tabel 10.

Respon vibrasi maksimum dengan kecepatan 20 km/jam dan penambahan K 5%

Variasi Redaman	Respon Vibrasi Maksimum (m/s)	Penurunan Vibrasi
Penambahan 50%	0,107	1,90%
Penambahan 100%	0,1	-4,76%
Penambahan 150%	0,094	-10,48%
Penambahan 200%	0,089	-15,24%
Penambahan 280%	0,081	-22,86%

Tabel 11.

Respon vibrasi maksimum dengan kecepatan 20 km/jam dan penambahan K 10%

Variasi Redaman	Respon Vibrasi Maksimum (m/s)	Penurunan Vibrasi
Penambahan 50%	0,105	0%
Penambahan 100%	0,099	-5,71%
Penambahan 150%	0,093	-11,43%
Penambahan 200%	0,087	-17,14%
Penambahan 280%	0,08	-23,81%

Tabel 12.

Respon vibrasi maksimum dengan kecepatan 15 km/jam dan K tetap

Variasi Redaman	Respon Vibrasi Maksimum (m/s)	Penurunan Vibrasi
Penambahan 50%	0,062	-40,95%
Penambahan 100%	0,057	-45,71%
Penambahan 150%	0,054	-48,57%
Penambahan 200%	0,051	-51,43%
Penambahan 280%	0,046	-56,19%

Tabel 13.

Respon vibrasi maksimum dengan kecepatan 15 km/jam dan penambahan K 5%

Variasi Redaman	Respon Vibrasi Maksimum (m/s)	Penurunan Vibrasi
Penambahan 50%	0,06	-42,86%
Penambahan 100%	0,056	-46,67%
Penambahan 150%	0,053	-49,52%
Penambahan 200%	0,05	-52,38%
Penambahan 280%	0,045	-57,14%

Tabel 14.

Respon vibrasi maksimum dengan kecepatan 15 km/jam dan penambahan K 10%

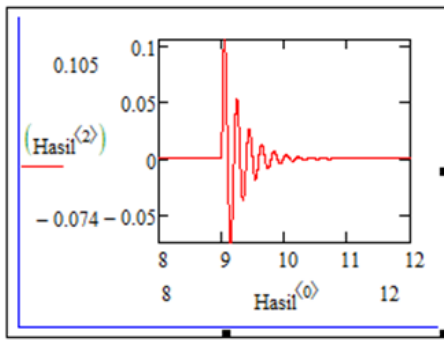
Variasi Redaman	Respon Vibrasi Maksimum (m/s)	Penurunan Vibrasi
Penambahan 50%	0,059	-43,81%
Penambahan 100%	0,055	-47,62%
Penambahan 150%	0,052	-50,48%
Penambahan 200%	0,049	-53,33%
Penambahan 280%	0,045	-57,14%

Berikut hasil simulasi respon vibrasi arah lateral dengan variasi kecepatan 20 km/jam dengan variasi penambahan nilai k dan c pada LRT dengan kondisi penumpang penuh yang tercantum dalam Tabel 9.

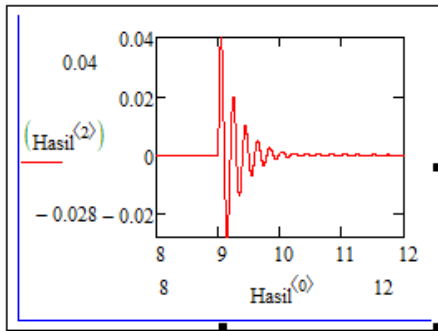
Berikut hasil simulasi respon vibrasi arah lateral dengan variasi kecepatan 15 km/jam dengan variasi penambahan nilai k dan c pada LRT dengan kondisi penumpang penuh yang tercantum dalam Tabel 12 dan Tabel 13.

d) Hasil Simulasi Respon Vibrasi pada Sistem Roda Rel dengan Variasi Jari-jari Belokan

Tikungan bandara LRT Palembang memiliki jari-jari sebesar 78 m dan panjang bogie TB1067 2,05 m. Jika dibandingkan dengan 100 kali jarak sumbu roda TB1067 yaitu 205 m, maka jari-jari tikungan bandara lebih kecil dari 100 kali panjang bogie, yang artinya derit dapat terjadi.



Gambar 14 Respon vibrasi arah lateral dengan jari-jari 78 m



Gambar 15 Respon vibrasi lateral dengan jari-jari 205 m

Berikut hasil simulasi respon vibrasi lateral dengan jari-jari 78 m.

Didapatkan respon vibrasi lateral dengan nilai vibrasi maksimum 0,105 m/s. Kemudian dilakukan simulasi dengan mengubah jari-jari tikungan dengan rekomendasi sesuai referensi yaitu sebesar 100 kali panjang bogie, 205 m. Berikut hasil simulasi respon vibrasi lateral dengan jari-jari 205 m.

Didapatkan respon vibrasi lateral dengan nilai vibrasi maksimum 0,04 m/s yang dimana dalam hal ini terjadi pengurangan vibrasi sebesar 61,9% yang artinya telah memenuhi target pengurangan 50% dari nilai acuan.

B. Pembahasan

Berdasarkan pengukuran bising LRT pada kondisi dinamis di tikungan bandara karakteristik bising derit yang terjadi dari lima kereta yang melintasi tikungan bandara didapatkan frekuensi dominan pada lima rentang frekuensi yaitu 842 Hz, 2844 Hz, 3709 Hz, dan 4675 Hz. Penyebab terjadinya derit adalah adanya ketidakstabilan gaya kontak arah lateral antara roda-rel dan kemudian frekuensi derit yang dominan terjadi pada beberapa nilai frekuensi natural roda yang beresonansi saat roda bergesekan dengan rel.

Untuk itu perlu diketahui karakteristik dinamik dari roda sebagai penyebab kebisingan derit. Analisis karakteristik dinamik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS. Setelah dilakukan simulasi maka didapatkan 25 nilai frekuensi natural beserta dengan modanya. Namun dalam penelitian ini diambil nilai frekuensi natural yang dekat dengan frekuensi derit. Empat nilai frekuensi natural itu adalah 965,34 Hz; 2989,5 Hz; 3977,4 Hz; dan 4722 Hz.

Kemudian nilai tersebut diverifikasi dengan persamaan matematis pada buku Roark's Formulas for Stress and Strain karya Warren C. Young. Tujuannya dilakukan verifikasi ini adalah untuk melakukan validasi dari hasil simulasi dari ANSYS 17.1. Untuk persamaan matematis ini hanya dapat menampilkan empat nilai frekuensi natural. Nilai tersebut adalah 1536,2 Hz; 2656,8 Hz; 3569,7 Hz; dan 5998,3 Hz.

Kemudian nilai antara frekuensi natural hasil simulasi dari ANSYS dibandingkan dengan nilai frekuensi natural dari persamaan. Untuk nilai frekuensi natural pertama, 965,34 Hz dan kelima, 4722,4 Hz tidak tersedia nilai pembanding pada frekuensi natural persamaan matematis karena nilai konstanta yang terbatas. Sementara diketahui pada frekuensi natural 2989,5 Hz nilai errornya 12,52% dan frekuensi natural 3977,4 Hz nilai errornya 11,42%.

Nilai frekuensi natural tersebut merupakan nilai yang berpengaruh terhadap terjadinya derit karena terjadi resonansi pada frekuensi tersebut saat roda bergesekan dengan rel melalui tikungan. Frekuensi natural 965,34 Hz berpengaruh terhadap frekuensi derit 842 Hz; frekuensi natural 2989,5 Hz berpengaruh terhadap frekuensi derit 2844 Hz; frekuensi natural 3977,4 Hz berpengaruh terhadap frekuensi derit 3709 Hz; dan frekuensi natural 4722,4 Hz berpengaruh terhadap frekuensi derit 4675 Hz.

Berdasarkan hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Mathcad, pada kondisi awal LRT dengan kapasitas penumpang normal dan kecepatan konstan 20 km/jam didapatkan vibrasi maksimum sebesar 0,105 m/s. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan mitigasi bising derit dengan cara memberikan rekomendasi agar mengurangi amplitudo vibrasi berupa kecepatan sebesar 50% dan cara ini dapat mereduksi bising derit sebesar 6 dB. Mengacu pada penelitian tersebut maka dilakukan pengendalian kebisingan dengan cara mengurangi respon vibrasi maksimum roda rel arah lateral sebesar 50% dari vibrasi maksimum awal. Maka yang menjadi target vibrasi maksimum adalah 0,0525 m/s.

Kemudian dilakukan simulasi untuk mendapatkan respon vibrasi berupa kecepatan arah lateral pada sistem roda rel dengan melakukan variasi kapasitas penumpang yaitu penumpang penuh, dan penumpang normal serta variasi kecepatan. Dengan target respon vibrasi maksimum 0,0525 m/s atau penurunan 50% maka untuk kondisi penumpang penuh kecepatan maksimum yang direkomendasikan adalah 13 km/jam dengan vibrasi maksimum 0,05 m/s atau penurunan vibrasi sebesar 52,38% dan untuk kondisi penumpang normal kecepatan maksimum yang direkomendasikan adalah 14 km/jam dengan vibrasi maksimum 0,051 m/s atau penurunan vibrasi sebesar 51,43%.

Kemudian dilakukan simulasi dengan cara yang kedua yaitu mengubah parameter suspensi pada LRT. Pada langkah ini dilakukan variasi untuk kecepatan aktual pengamat yaitu 20 km/jam dan 15 km/jam dengan variasi penambahan C dan K. Untuk kecepatan 20 km/jam dengan kondisi batas yang ditetapkan respon vibrasi maksimum tidak dapat memenuhi target yang ditetapkan yaitu pengurangan 50%. Namun pengurangan maksimum didapat sebesar 23,81% atau vibrasi maksimum 0,08 m/s dengan melakukan penambahan K sebesar 10% dan penambahan C sebesar 280%. Kemudian untuk kecepatan 15 km/jam dengan kondisi batas yang ditetapkan dapat dilakukan pengurangan vibrasi sebesar 50,48% atau vibrasi maksimum 0,052 m/s dengan melakukan penambahan C sebesar 200%.

Kemudian berdasarkan referensi Railway Noise and Vibration diberikan rekomendasi untuk menghindari derit desain jari-jari lintasan kereta harus lebih besar dari 100 kali jarak sumbu roda bogie. Saat ini memang tidak dimungkinkan dilakukan konstruksi ulang untuk mengubah jari-jari rel, namun kedepannya jika gerbong LRT dengan

bogie TB1067 digunakan untuk menghindari terjadinya derit maka besar jari-jari tikungan yang direkomendasikan adalah 100 kali panjang bogie atau 205 m.

V. KESIMPULAN

Karakteristik bising derit LRT Palembang terjadi pada rentang frekuensi 800-5000 Hz dengan karakteristik dominan terjadi pada frekuensi 842 Hz, 2844 Hz, 3709 Hz, dan 4675 Hz.

Diketahui karakteristik dinamik roda LRT sebagai salah satu penyebab kebisingan derit yaitu memiliki frekuensi natural sebesar 965,34 Hz; 2989,5 Hz; 3977,4 Hz; dan 4722 Hz.

Untuk mengurangi kebisingan derit sebesar 6 dB diberikan rekomendasi kecepatan maksimum pada LRT saat melalui tikungan bandara. LRT dengan kondisi penumpang penuh maka kecepatan maksimum yang direkomendasikan adalah 13 km/jam dan LRT dengan kondisi penumpang normal kecepatan maksimum yang direkomendasikan adalah 14 km/jam.

Selain itu untuk mengurangi kebisingan derit dapat dilakukan penambahan koefisien kekakuan dan redaman. Untuk LRT dengan kecepatan 20 km/jam diberikan rekomendasi penambahan koefisien kekakuan sebesar 10% dan penambahan koefisien redaman sebesar 280% didapatkan pengurangan vibrasi maksimum 23,81%.

Untuk LRT dengan kecepatan 15 km/jam diberikan rekomendasi penambahan koefisien redaman sebesar 200% didapatkan pengurangan vibrasi maksimum 51,43%.

Diketahui salah satu penyebab terjadinya kebisingan derit adalah jari-jari tikungan bandara yaitu sebesar 78 m yang lebih kecil dari 100 kali jarak sumbu roda bogie. Maka diberikan rekomendasi kedepannya untuk lintasan tikungan LRT dengan bogie TB1067 memiliki jari-jari minimum 205 m untuk menghindari terjadinya derit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Hanson, J. Jiang, B. Dowdell, and R. Dwight, "Curve squeal: causes, treatments and results," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2014, vol. 249, no. 1, pp. 6316–6323.
- [2] C. Talotte, P.-E. Gautier, D. J. Thompson, and C. Hanson, "Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey," *J. Sound Vib.*, vol. 267, no. 3, pp. 447–468, 2003.
- [3] D. Thompson, G. Squicciarini, E. Ntotsios, and L. Baeza, "Noise and Vibration from Railway Vehicles," in *Handbook of Railway Vehicle Dynamics, Second Edition*, CRC Press, 2019, pp. 521–578.
- [4] I. Merideno, J. Nieto, N. Gil-Negrete, J. G. G. Ortiz, A. Landaberea, and J. Iartza, "Theoretical prediction of the damping of a railway wheel with sandwich-type dampers," *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 20, pp. 4897–4911, 2014.
- [5] J. Han, X. Xiao, Y. Wu, Z. Wen, and G. Zhao, "Effect of rail corrugation on metro interior noise and its control," *Appl. Acoust.*, vol. 130, pp. 63–70, 2018.
- [6] P. A. Meehan and X. Liu, "Modelling and mitigation of wheel squeal noise amplitude," *J. Sound Vib.*, vol. 413, pp. 144–158, 2018.
- [7] *SK Menteri Negara Lingkungan Hidup No: Kep.Men-48/MEN.LH/11 tahun 1996*.
- [8] D. Thompson, *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier, 2008.
- [9] "Berita INKA - Mengenal Istilah Bogie Pada Kereta Api (Bag.1)." [Online]. Available: <https://www.inka.co.id/berita/58>. [Accessed: 06-Feb-2020].
- [10] R. J. Roark and W. C. Young, *Formulas for Stress and Strain*, vol. 965. McGraw-Hill New York, 1971.