

Analisis dan Penanganan Interior Noise pada Rolling Stock MRT Jakarta Berdasarkan Faktor Kecepatan, Track Base, dan Rel

Galang Muammar Katumbirian^{1*}, Muhammad Ishaq Arya Suluh², Hadi Sutanto³

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

²Project Management for Railway System Division PT MRT Jakarta (Perseroda), Indonesia

³Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

| Article Info | Abstract |
|--|---|
| <i>Article history:</i> | <i>Noise is unwanted sound generated by operational activities at certain levels and durations that can cause disturbances to human health and environmental comfort. Train noise can originate from several mechanisms and systems, but the main source is rolling noise. Rolling noise is caused by many factors, with the primary ones including train speed, train design, rail conditions, and weather. The current noise level in the Jakarta MRT train set, reaching 90–96 dB, still exceeds the required threshold. Referring to the document Volume 4: Employee's Requirements Particular Specification, Design and Installation issued in 2014, the maximum acceptable noise levels within tolerance are 75 dB for elevated areas and 85 dB for tunnels. To address this issue, various studies have been conducted by MRT Jakarta in collaboration with contractors and academics. Simulations, tests, and analyses related to noise issues were carried out, and several factors were identified that can reduce noise levels, including braking methods, track base selection, corrugation control, and operational speed.</i> |
| Received December, 03 2025 | |
| Accepted December, 04 2025 | |
| <i>Keywords:</i> MRT Jakarta, Rolling Noise, Roughness, Corrugation. | |

| Info Artikel | Abstrak |
|--|---|
| <i>Histori Artikel:</i> | <i>Noise adalah bunyi yang tidak diinginkan dari usaha atau kegiatan dalam tingkat dan waktu tertentu yang dapat menimbulkan gangguan kesehatan manusia dan kenyamanan lingkungan. Noise kereta dapat berasal dari beberapa mekanisme dan sistem. Namun penyebab utamanya adalah rolling noise. Rolling noise disebabkan oleh banyak faktor. Beberapa faktor yang utama diantaranya adalah kecepatan kereta, desain kereta, kondisi rel dan cuaca. Tingkat noise dalam train set MRT Jakarta pada saat ini yang mencapai 90-96 dB masih melebihi ambang batas yang dipersyaratkan. Mengacu pada dokumen Volume 4: Employee's Requirements Particular Specification, Design And Installation, keluaran tahun 2014, tingkat noise maksimum yang masuk dalam toleransi untuk area elevated dan tunnel masing-masing adalah 75 dB dan 85 dB. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, telah dilakukan berbagai macam studi oleh MRT Jakarta yang bekerja sama dengan kontraktor dan akademisi. Simulasi, pengujian, dan analisis terkait isu noise dan didapatkan beberapa faktor yang dapat menekan tingkat kebisingan di antaranya adalah metode pengereman, pemilihan track base, pengendalian korugasi, dan kecepatan operasional</i> |
| Diserahkan: 03 Desember 2025 | |
| Diterima: 04 Desember 2025 | |
| Kata Kunci: MRT Jakarta, Rolling Noise, Roughness, Korugasi. | |

*Corresponding author. Galang Muammar Katumbirian
Email address: GALANG.12025004747@student.atmajaya.ac.id

1. PENDAHULUAN

PT. MRT Jakarta adalah suatu perusahaan milik Pemerintah Provinsi DKI Jakarta yang bergerak di bidang pembangunan, perawatan dan pengembangan sistem transportasi berbasis kereta listrik. MRT Jakarta memiliki 13 stasiun yang terdiri dari 7 jalur layang dan 6 jalur bawah tanah serta 1 depo dengan total jalur sepanjang ±16 km.

Sebagai perusahaan yang bergerak di bidang jasa pelayanan publik, MRT Jakarta harus mengedepankan kepuasan dan kenyamanan pelanggan. Salah satu aspek yang dapat mengganggu kenyamanan pengguna adalah *noise*/kebisingan kereta.

Selain sebagai moda transportasi modern yang selalu mengedepankan efisiensi dan kenyamanan, MRT Jakarta menjadi acuan kualitas penyelenggaraan sistem perkeretaapian metro di Indonesia. Oleh karena itu, aspek kenyamanan penumpang menjadi komponen penting. Tingkat kebisingan yang melebihi standar yang berlaku tidak hanya mengganggu kenyamanan, namun juga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan apabila terjadi secara berulang dalam jangka panjang.

Tingkat *noise* dalam *train set* MRT Jakarta pada saat ini ditemukan lebih tinggi dibanding dengan standar yang diacu. Tingkat *noise* saat ini berada di level 90-96 dB. Apabila mengacu pada dokumen Volume 4: *Employe's Requirements Particular Specification, Design, and Installation* yang dirilis pada 2014 dinyatakan tingkat *noise* maksimum untuk *area elevated* adalah 75 dB dan untuk *area tunnel* adalah 85 dB. Sementara jika mengacu pada regulasi yang ada di Indonesia, Peraturan Menteri No.175 Tahun 2015 dan Peraturan Menteri No.49 Tahun 2023, batas ambang maksimum kebisingan di kereta metro saat ini adalah sebesar 80 dB, dan sebagai operator kereta metro di Jakarta, MRT Jakarta harus memenuhi persyaratan regulasi tersebut agar dapat menjalankan operasionalnya.

Fenomena tingginya interior *noise* MRT Jakarta bukanlah permasalahan tunggal, melainkan hasil interaksi kompleks antara kondisi sarana, prasarana, dan juga karakteristik operasional. Secara umum, sumber *noise* pada sistem perkeretaapian umumnya disebabkan beberapa faktor. Faktor yang pertama adalah *noise* yang dihasilkan dari vibrasi komponen infrastruktur perkeretaapian, seperti rel, roda, dan kereta itu sendiri. Hal ini disebut dengan *rolling noise*.

Faktor kedua adalah *aerodynamic noise* yang dihasilkan dari kereta. Aliran udara disekitar kereta mengalami turbulensi dan hal tersebut menghasilkan suara. *Noise* ini umumnya muncul pada kereta dengan kecepatan tinggi. Untuk kereta dengan kecepatan dibawah 200 km/h didominasi oleh *rolling noise*.

Sejak *fase testing and commissioning* hingga operasi berjalan, berbagai pengukuran telah menunjukkan bahwa interior *noise* MRT Jakarta saat ini telah berada diatas standar desain awal. Kondisi ini mendorong dilakukannya studi, pengujian lapangan, serta simulasi teknis untuk mengidentifikasi akar permasalahan sekaligus merumuskan langkah mitigasi terbaik. Dengan kompleksitas penyebab dan dampak yang ditimbulkan, diperlukan analisis mendalam yang mengidentifikasi berbagai sumber kebisingan dan juga mengevaluasi efektivitas dari berbagai metode penanganan yang digunakan.

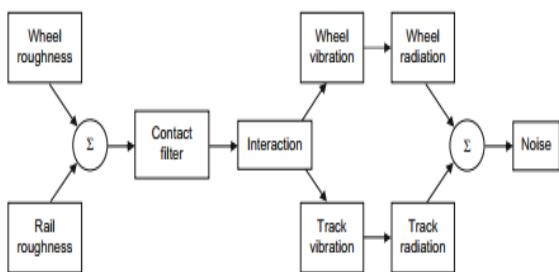
1.1. Rolling Noise

Sumber *noise* paling besar dari sistem perkeretaapian adalah *rolling noise* yang disebabkan oleh vibrasi roda dan rel yang dihasilkan pada kontak rel/roda. Interaksi antara roda dan rel pada *area kontak* mereka dapat menimbulkan *noise* dengan tingkat yang sangat

tinggi. Baik roda maupun rel tidak seluruhnya memiliki permukaan yang halus. *Roughness* pada permukaan roda dan rel juga menyebabkan getaran vertikal dari sistem roda sehingga menimbulkan *noise* (David Thompson, 2009).

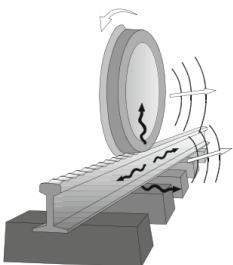
Rolling noise dipengaruhi oleh kecepatan dan desain kereta, kondisi rel, serta cuaca. Langkah mitigasi untuk mengurangi *noise* tersebut diantaranya dengan mengurangi *track roughness*, *noise barrier*, dan modifikasi struktur atau sistem peredam.

Rolling noise ini bertambah dengan meningkatnya kecepatan kereta (V) dengan aproksimasi sekitar $30 \log_{10} V$ atau meningkat sebesar 9 dB setiap kecepatan bertambah dua kali lebih tinggi.



Gambar 1.
Rolling Noise Generation

Rolling noise juga memiliki spektrum gelombang yang cukup lebar, dengan meningkatnya frekuensi yang seiring dengan peningkatan kecepatan kereta. Penelitian pada gedung DP Mall Semarang ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui alur proses dari pemasangan instalasi *plumbing* dari gedung DP Mall Semarang, sehingga sistem instalasi *plumbing* dapat berjalan sesuai rencana dan sesuai fungsi serta selesai sesuai batas waktu atau kurva S yang sudah ditentukan.



Gambar 2.
Mechanism of Rolling Noise Generation

1.2. Roughness

Hubungan antara roda kereta dan rel merupakan salah satu sumber utama *noise* dan getaran misalnya rel yang mengalami kerusakan seringkali lebih kasar, yang dapat meningkatkan tekanan suara hingga 20 dB. Kasarannya dapat dikurangi dengan *grinding* rel untuk menghilangkan tepi-tepi bergelombang dan dengan melumasi rel (Zdenka Popović, Milica Mićić, Luka Lazarević, 2022).

Penyebab utama dari *roughness* yang tinggi adalah adanya rel yang mengalami *corrugated* dan *waved track*. *Corrugated/korugasi* dan *waved track/ bergelombang* tersebut terbentuk secara longitudinal selama operasi kereta api. Area yang terpengaruh seringkali tidak beraturan dan memiliki panjang yang bervariasi mulai dari puluhan milimeter hingga ratusan milimeter dengan kedalaman maksimum mencapai puluhan mikron.

Tingkat kekasaran adalah tingkat dalam dB yang ditentukan oleh persamaan berikut:

$$Lr = 20 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) \text{ dB}$$

Lr : Level of Roughness

r : Root Mean Square Roughness Amplitude

r_0 : 1μ is reference roughness

Saat melakukan pengukuran *noise*, beberapa kondisi harus dipenuhi terutama dari sisi permukaan kepala rel dan roda agar dapat memberikan hasil dan evaluasi yang sesuai.

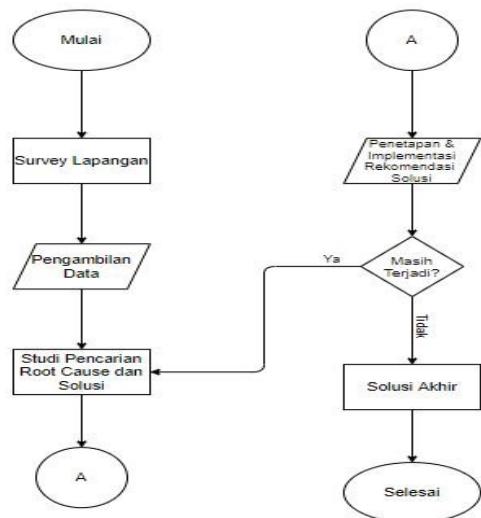
1.3. Rail Corrugation

Rail corrugation merupakan salah satu masalah yang paling sering dihadapi dalam dunia industri kereta api. Pembentukan dan perkembangan korugasi rel menyebabkan getaran yang kuat pada struktur kereta dan rel yang berakibat pada *noise* dan ketidaknyamanan perjalanan kereta.

Pembentukan korugasi rel disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah getaran torsi dari *wheelset*, kecepatan kereta, dan *fastening system stiffness*. Hubungan antara karakteristik struktur dari lintasan dan pembentukan korugasi termasuk juga *irregularities* rel, cacat geometri lintasan, dan jarak antar-bantalan. Faktor lainnya adalah pengaruh deformasi plastis rel sebagai mekanisme yang mungkin berpengaruh dalam pertumbuhan korugasi (Muhammad Ishaq Arya Suluh, Arif Rahmat, Hadi Sutanto, 2024)

2. METODE PELAKSANAAN

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan akar permasalahan dan solusi terbaik untuk menjaga agar tingkat *noise* kereta MRT Jakarta tetap sesuai dengan peraturan. Metodologi yang digunakan digambarkan dalam diagram pada Gambar 3.



Gambar 3.
Diagram Alur Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kronologi Kejadian

Berikut kronologi terkait dengan dokumentasi tingkat *noise* yang digunakan MRT Jakarta:

- Pada dokumen “Volume 4: *Employer’s Requirements Particular Specification, Design and Installation*” yang dirilis pada 2014, dinyatakan tingkat *noise* maksimum untuk *area elevated* adalah 75 dB dan untuk *area tunnel* adalah 85 dB.
- Pada tahun 2018 saat *testing & commissioning* terdapat temuan bahwa tingkat *noise* kereta MRT Jakarta berada diatas 75 dB. Menurut pihak *Contract Package* (CP) 108, hal tersebut diakibatkan kondisi prasarana/rel tidak sesuai dengan standar ISO.
- Pada tahun 2019 dilakukan uji pertama dari Direktorat Jendral Perkeretaapian, dengan metode pengujian mereka, didapatkan hasil tingkat *noise* di *elevated* maksimum 80,8 dB dan di dalam *tunnel* maksimum 84,9 dB. Dengan mengacu pada Peraturan Menteri 13 Tahun 2011 maka tingkat *noise* tersebut memenuhi kriteria (maksimal 85 dB), namun apabila mengacu pada *Technical Design* CP 108 tidak memenuhi (*elevated* maksimal 75 dB dan *tunnel* maksimal 85 dB).
- Pada Desember 2019, dilakukan uji coba pemasangan *seat cushion* untuk mereduksi *noise* dan hasilnya dapat menurunkan *noise* sekitar 2 dB.
- Pada 14 Februari 2020 telah dilakukan studi dari pihak CP108/Sumitomo terkait tingkat *noise* di MRT Jakarta dengan membandingkan kondisi sarana serta prasarana MRT Jakarta dengan di Jepang. Dari studi tersebut, disimpulkan bahwa kondisi prasarana di MRT Jakarta tidak memenuhi standar seharusnya.
- Kemudian pada 13 April 2020 dilakukan studi berkerjasama dengan dengan Institut Teknologi Bandung (ITB) terkait tingkat *interior noise* dan didapatkan data tingkat *noise* MRT Jakarta berada di angka 82-88 dB yang artinya sudah melebihi standar mutu.
- Menindaklanjuti hasil studi dari ITB, pada Januari 2021 dilakukan penutupan *drain tube* dan mereduksi sekitar 1 dB.
- Pada tahun 2022 dilakukan *rail corrugation examination* dan didapatkan data korugasi pada beberapa titik yaitu Fatmawati (FTM) - Lebak Bulus (LBB) (1+600 - 1+700) dengan panjang korugasi per 10 cm, Asean (ASN) - Senayan (SNY) (9+630 – 9+730) panjang korugasi per 4 cm, dan Bendungan Hilir (BNH) – Setia Budi (STB) (12+520 – 12+620) Panjang korugasi per 7 cm dan 4,5 cm.
- Pada tahun 2023 dilakukan uji *noise* oleh Direktorat Jendral Perkeretaapian dan didapatkan hasil untuk tingkat *noise* di *area elevated* sebesar 76,6-81,5 dB dan untuk *area tunnel* sebesar 81,2-84,7 dB.
- Pada 2023 untuk menindaklanjuti temuan *rail corrugation*, Direktorat Operasi dan Pemeliharaan melakukan pengadaan *grinding machine*.
- Pada 16-27 Oktober 2023, dilakukan *rail milling* untuk area Cipete Raya (CPR)-FTM, SNY-ASN, STB-BNH, BNH-STB, FTM-LBB, dan FTM-CPR.
- Pada Oktober 2023 dilakukan uji *noise* dengan pembatasan kecepatan dan *grinding* di area yang terindikasi korugasi.

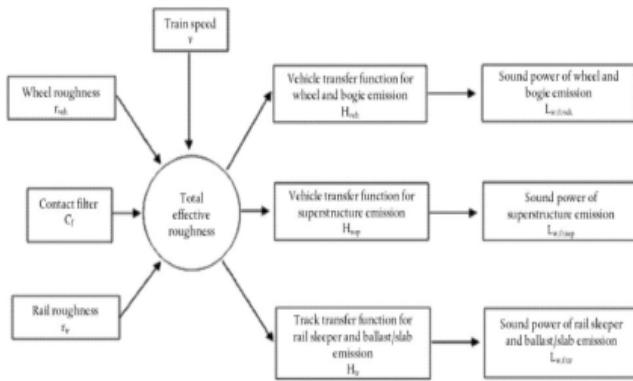
3.2. Perhitungan dan Analisis

Sound Power Level (SPL) dari *rolling noise* menurut CNOSSOS-EU dikalkulasi dengan menggunakan 4 input utama, yaitu:

- a) Kecepatan kereta (v): kecepatan ini bersama dengan *wavelength* (λ) dari kekasaran rel dan roda yang dikonversikan menjadi frekuensi dengan hubungan $f = v/\lambda$.
- b) Tingkat kekasaran rel ($L_{r,TR,i}$): kekasaran ini diinput secara manual dengan menggunakan data MRTJ. Indeks I menunjuk pada *band wavelength*, tergantung dari

kecepatan kereta maka data ini akan merujuk pada frekuensi yang berbeda. Penyesuaian *range* dilakukan sebelum melakukan perhitungan.

- c) Tingkat kekasaran roda ($L_{r,VEH,i}$): kekasaran ini dapat diinput secara manual menggunakan data CNOSSOS-EU.
- d) Kontak *filter* antara roda dan rel ($A_{3,i}$): data ini juga didapatkan dari CNOSSOS-EU.



Gambar 4.

Input Sound Power Level Menurut CNOSSOS-EU (Verheijen, Edwin, Van Beek, Annemarie, 2019)

Dari empat data input tersebut maka akan didapatkan angka kekasaran efektif dengan formula sebagai berikut:

$$L_{R,TOT,i} = 10 \log_{10}(10^{L_{r,TR,i}10} + 10^{L_{r,VEH,i}10}) + A_{3,i} \quad \dots \quad (1)$$

Untuk tiap as roda pada tiap gerbong, total kekasaran efek ini akan digunakan sebagai sumber eksitasi dari fungsi-fungsi transfer berikut:

- a. Fungsi *transfer* dari kekasaran total terhadap radiasi suara track ($L_{H,TR,i}$)
Data ini didapatkan melalui CNOSSOS-EU dengan memperhatikan klasifikasi klasifikasi yang terdekat dengan MRT Jakarta.
- b. Fungsi *transfer* dari kekasaran total terhadap radiasi suara oleh roda dan *bogie* ($L_{H,VEH,i}$)
Data ini didapatkan melalui CNOSSOS-EU dengan memperhatikan klasifikasi klasifikasi yang terdekat dengan MRT Jakarta.
- c. Fungsi *transfer* dari kekasaran total terhadap radiasi suara oleh bangunan kabin
Data ini didapatkan melalui CNOSSOS-EU dengan memperhatikan klasifikasi klasifikasi yang terdekat dengan MRT Jakarta.

Dari fungsi-fungsi *transfer* ini maka sound poert dari roda dan *bogie* ($L_{W,0,VEH,i}$), sound power dari bangunan kabin kereta ($L_{W,0,VEHSUP,i}$), dan sound power dari rail track ($L_{W,0,TR,i}$) seperti yang ditunjukkan pada skema perhitungan sound power level skema di atas dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} L_{W,0,TR,i} &= L_{R,TOT,i} + L_{H,TR,i} + 10x \log_{10}(Na) \\ L_{W,0,VEH,i} &= L_{R,TOT,i} + L_{H,VEH,i} + 10x \log_{10}(Na) \\ L_{W,0,VEHSUP,i} &= L_{R,TOT,i} + L_{H,VEHSUP,i} + 10x \log_{10}(Na) \end{aligned} \quad \dots \quad (2)$$

Na adalah jumlah as roda di tiap gerbong kereta. Perlu diingat bahwa *sound power* yang didapatkan disini adalah dalam unit *sound power* per meter [dB/m], oleh karena itu tergantung dari panjang kereta dan lokasi masing-masing bagian kereta terhadap titik pengukuran suara, maka tingkat tekanan suara yang didapatkan akan berbeda. tingginya biaya perawatan dan pengantian bagi perusahaan.

Klasifikasi yang didapatkan dari CNOSSOS-EU untuk mendekati spesifikasi dari MRTJ adalah sebagai berikut:

- Kekasaran rel diinput dari hasil pengukuran dengan merata-rata antara rel kanan dan rel kiri.
- Kekasaran roda mengacu pada sistem pengereman roda *cast iron tread brake*.
- Kontak filter diambil untuk as roda dengan load 25 kN dan diameter 920 mm.
- Diameter roda dianggap 920 mm.
- Jumlah as roda per kereta adalah 4 buah.
- Struktur *track* menggunakan kombinasi *monoblock sleeper* dengan *soft stiffness rail pad*.
- Kecepatan kereta dianggap 90 km/jam. biaya perawatan dan penggantian bagi perusahaan.

Tingkat tekanan suara akibat dari *rolling noise* dihitung pada jarak 7.5 m dan ketinggian 1.2 m dari tengah kereta, dimana atenuasi geometris (A_{div}), penyebaran suara pada arah horizontal ($\Delta L_{dir,hor,i}$) dan vertical ($\Delta L_{dir,ver,i}$), dan pantulan dari sisi bawah kereta diperhitungkan sesuai dengan CNOSSOS-EU.

Tingkat tekanan suara didapatkan melalui persamaan berikut:

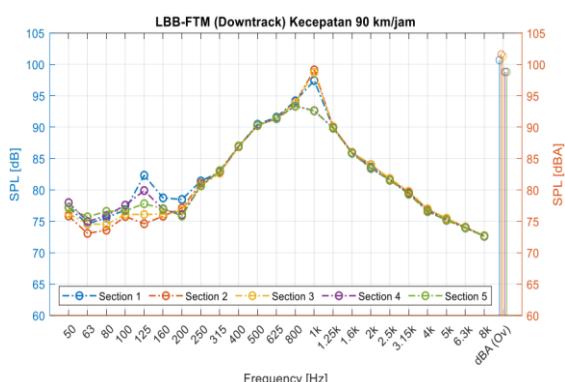
$$L_{W,i} = 10 \times \log_{10} \left(10^{\frac{L_{W,0,TR,i}}{10}} + 10^{\frac{L_{W,0,VEH,i}}{10}} + 10^{\frac{L_{W,0,VEHSUP,i}}{10}} \right),$$

$$L_{p,i} = L_{W,i} + \Delta L_{dir,hor,i} + \Delta L_{dir,ver,i} - A_{div} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

Dalam penelitian ini, batas kekasaran rel dalam kedua standar tersebut digunakan sebagai pembanding untuk mengetahui “roughness severity” dari rail track MRTJ. Meskipun demikian, beberapa catatan terkait batas kekasaran rel dalam ISO 3095/3381:

- ISO 3095/3381 (2005) merupakan standar untuk mengukur noise train set / rail bound vehicle dengan prasarana yang dikhkususkan untuk pengujian, bukan rail track untuk operasional.
- ISO 3095/3381 (2005) digunakan untuk pengukuran train set dengan kecepatan konstan pada panjang lintasan sekitar 75 m. Dalam ISO 3381, kecepatan pengujian ditetapkan sebesar 60 km/jam.
- Batas kekasaran rel akan lebih rendah untuk kecepatan yang lebih tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh (ISO 3095, 2013) yang dapat diaplikasikan untuk pengujian kereta api cepat.

Perubahan tekanan suara akibat kekasaran rel, kecepatan, dan juga bantalan disimulasikan untuk melihat bagaimana perawatan harus dilakukan. Berikut adalah hasil simulasi untuk petak jalur LBB-FTM downtrack.



Gambar 5.

Grafik Simulasi SPL Petak LBB-FTM

Dapat terlihat pada Gambar 5 bahwa kekasaran rel yang meningkat pada frekuensi 1 kHz di section 1- 3. Hal ini dikarenakan kekasaran yang tinggi pada *wavelength* 25 mm pada ketiga section tersebut, maka tingkat tekanan suara diperkirakan akan menjadi sama seperti section 4-5, dimana penurunan *maksimum* bisa mencapai 2.8 dBA.

Pada Tabel 1 dibawah ini juga terlihat jika kecepatan operasional diturunkan, dapat terlihat tren penurunan yang lebih signifikan terjadi pada section 1-3.

Tabel 1.

Grafik Simulasi SPL Petak LBB-FTM

| <i>Section</i> | <i>Sound Pressure (dBA)</i> | | |
|------------------|-----------------------------|----------------|----------------|
| | 90 km/h | 80 km/h | 70 km/h |
| <i>Section 1</i> | 100,7 | 98,2 | 96,9 |
| <i>Section 2</i> | 101,6 | 98,4 | 97,5 |
| <i>Section 3</i> | 101,3 | 98,4 | 97,4 |
| <i>Section 4</i> | 98,8 | 97,2 | 95,8 |
| <i>Section 5</i> | 98,8 | 97,2 | 95,7 |

Selain perubahan kecepatan, dikalkulasi juga perubahan track base seperti pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2.

Simulasi SPL Petak LBB-FTM dengan Perubahan *Track Base*

| <i>Section</i> | <i>Sound Pressure (dBA) (Kecepatan 90 km/h) LBB-FTM DT</i> | | | | | | |
|------------------|--|--|---|---|--|---|---------------------------------|
| | <i>Monoblock Sleeper on Soft Rail Pad</i> | <i>Monoblock Sleeper on Med Rail Pad</i> | <i>Monoblock Sleeper on Hard Rail Pad</i> | <i>B-block Sleeper on Soft Rail Pad</i> | <i>B-block Sleeper on Med Rail Pad</i> | <i>B-block Sleeper on Hard Rail Pad</i> | <i>Sleeper on Hard Rail Pad</i> |
| <i>Section 1</i> | 100,7 | 98,8 | 97,2 | 101 | 98,4 | 96,2 | |
| <i>Section 2</i> | 101,6 | 99,5 | 98,4 | 101,9 | 99,3 | 97,2 | |
| <i>Section 3</i> | 101,3 | 99,3 | 98,2 | 101,7 | 99,1 | 96,9 | |
| <i>Section 4</i> | 98,8 | 97,1 | 96,3 | 98,8 | 96,5 | 94,9 | |
| <i>Section 5</i> | 98,8 | 97,1 | 96,3 | 98,8 | 96,5 | 94,9 | |

Pada tabel di atas menunjukkan bahwa *bi-block sleeper* dengan menggunakan *hard rail pad* menurunkan tingkat tekanan suara 3,9-4,4 dBA dibandingkan kondisi normal.

Selain itu juga dilakukan simulasi terhadap bagaimana pengaruh *roughness* terhadap penurunan tingkat tekanan suara dengan hasil seperti pada Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3.

Grafik Simulasi SPL Petak LBB-FTM dengan Perubahan *Roughness*

| <i>Section</i> | <i>Sound Pressure (dBA) (Kecepatan 90 km/h) LBB-FTM DT</i> | | | |
|------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | <i>Default Roughness</i> | <i>Roughness 2 dB</i> | <i>Roughness 4 dB</i> | <i>Roughness 6 dB</i> |
| <i>Section 1</i> | 100,7 | 99,6 | 98,7 | 98,1 |
| <i>Section 2</i> | 101,6 | 100,7 | 100 | 99,5 |
| <i>Section 3</i> | 101,3 | 100,4 | 99,7 | 99,2 |
| <i>Section 4</i> | 98,8 | 96,9 | 95,2 | 93,5 |
| <i>Section 5</i> | 98,8 | 96,9 | 95,1 | 93,4 |

Dari Tabel di atas diperlihatkan bagaimana penurunan tingkat tekanan suara apabila keseluruhan kekasaran rel diturunkan antara 2 dB – 6 dB. Pada section 4-5 penurunan tingkat tekanan suara sebanding dengan penurunan dari kekasaran rel. Namun apabila terdapat satu band *wavelength* yang cukup tinggi, seperti pada section 1-2, maka penurunan akan berkurang. Hal ini menunjukkan, satu band *wavelength* yang cukup tinggi memiliki *impact* yang signifikan pada *overall radiasi suara*.

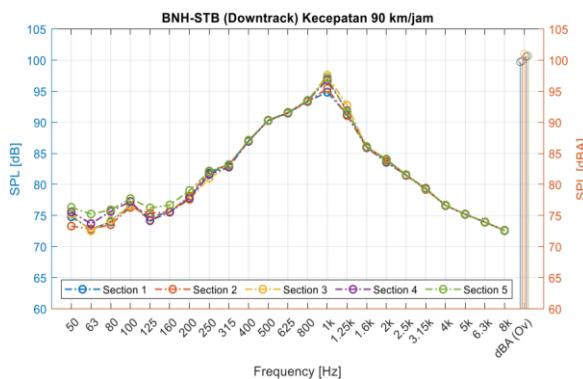
Tabel 4.

Grafik Simulasi SPL Petak LBB-FTM dengan Perubahan Sistem Pengereman

| Sound Pressure (dBA) (Kecepatan 90 km/h) LBB-FTM DT | | | |
|---|-----------------|-----------------|------------|
| Section | Cast Iron Brake | Composite Brake | Disc Brake |
| Section 1 | 100,7 | 98,2 | 96,9 |
| Section 2 | 101,6 | 98,4 | 97,5 |
| Section 3 | 101,3 | 98,4 | 97,4 |
| Section 4 | 98,8 | 97,2 | 95,8 |
| Section 5 | 98,8 | 97,2 | 95,7 |

Pada Tabel 4, ditunjukkan penurunan tingkat tekanan suara apabila dilakukan perubahan pada sistem pengereman kereta MRT Jakarta. Pada *section 4-5* penurunan tingkat tekanan suara sangat signifikan, hal ini terjadi akibat penurunan kekasaran roda kereta pada sistem *composite* atau *disc brake*.

Sebagai pembanding dilakukan juga simulasi untuk petak jalan BNH-STB *downtrack* dengan hasil simulasi yang hampir sama dengan LBB-FTM *downtrack*. Diperlihatkan tingkat tekanan suara yang sangat tinggi pada frekuensi 1 kHz di keseluruhan *section*. Hal ini dikarenakan kekasaran yang tinggi pada *wavelength* 20 mm - 25 mm. Analisa dari berbagai *treatment* hampir sama dengan lokasi LBB-FTM section 1-3.

**Gambar 6.**

Grafik Simulasi SPL Petak BNH-STB

Tabel 5.

Simulasi SPL Petak LBB-FTM

| Sound Pressure (dBA) | | | |
|----------------------|---------|---------|---------|
| Section | 90 km/h | 80 km/h | 70 km/h |
| Section 1 | 99,7 | 97,9 | 96,5 |
| Section 2 | 99,9 | 97,9 | 96,6 |
| Section 3 | 101 | 98,8 | 97,6 |
| Section 4 | 100,6 | 98,4 | 97,2 |
| Section 5 | 100,7 | 98,5 | 97,3 |

Tabel 6.

Simulasi SPL Petak LBB-FTM dengan Perubahan *Track Base*

| Sound Pressure (dBA) (Kecepatan 90 km/h) BNH-STB DT | | | | | | | |
|---|---|---|--|--|----------------------------|--------------------------|--|
| Section | Monoblock Sleeper on Soft Rail Pad | Monoblock Sleeper on Med Rail Pad | Monoblock Sleeper on Hard Rail Pad | B-block Sleeper on Soft Rail Pad | B-block on Med Rail Pad | Sleeper Hard Rail Pad | B-block Sleeper on Hard Rail Pad |
| Section 1 | 99,7 | 97,9 | 96,9 | 99,8 | 97,4 | 95,6 | |
| Section 2 | 99,9 | 98,0 | 97,1 | 100,0 | 97,6 | 95,8 | |
| Section 3 | 101 | 99,1 | 99,1 | 101,3 | 98,8 | 96,8 | |
| Section 4 | 100,6 | 98,7 | 97,6 | 100,8 | 98,3 | 96,4 | |
| Section 5 | 100,7 | 98,8 | 97,7 | 101,0 | 98,5 | 96,5 | |

Tabel 7.Simulasi SPL Petak LBB-FTM dengan Perubahan *Roughness*

| Sound Pressure (dBA) (Kecepatan 90 km/h) BNH-STB DT | | | | |
|---|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| Section | Default Roughness | Roughness 2 dB | Roughness 4 dB | Roughness 6 dB |
| Section 1 | 99,7 | 98,2 | 96,9 | 95,9 |
| Section 2 | 99,9 | 98,5 | 97,3 | 96,3 |
| Section 3 | 101 | 100 | 99,2 | 98,6 |
| Section 4 | 100,6 | 99,4 | 98,5 | 97,8 |
| Section 5 | 100,7 | 99,6 | 98,7 | 98,1 |

Tabel 8.

Grafik Simulasi SPL Petak LBB-FTM dengan Perubahan Sistem Pengereman

| Sound Pressure (dBA) (Kecepatan 90 km/h) BNH-STB DT | | | |
|---|-----------------|-----------------|------------|
| Section | Cast Iron Brake | Composite Brake | Disc Brake |
| Section 1 | 99,7 | 93,9 | 93,9 |
| Section 2 | 99,9 | 94,6 | 94,5 |
| Section 3 | 101,0 | 97,7 | 97,7 |
| Section 4 | 100,6 | 96,6 | 96,6 |
| Section 5 | 100,7 | 97,0 | 96,9 |

Sementara itu dari hasil penelitian yang dilakukan ITB, uji dinamis dilakukan untuk mendapatkan karakteristik suara terkait interaksi roda dengan rel, suara diluar, dan interior trainset, serta suara diluar *train set* pada *area elevated* dan *tunnel*.

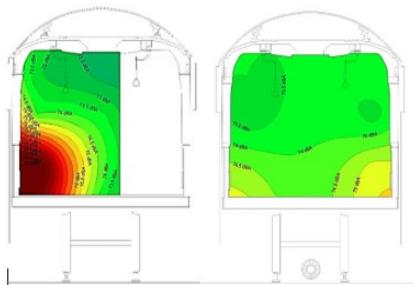
Kemudian untuk mengetahui kemampuan komponen kereta (dinding, lantai, pintu dan atap) untuk menahan suara yang masuk dari eksterior ke interor dan sebaliknya dilakukan pengukuran *noise reduction* (NR) dan didapatkan data seperti pada Tabel 9 di bawah ini.

Tabel 9.Pengukuran *Noise Reduction*

| Komponen | NR (dB) |
|-----------------|---------|
| Pintu | 27,6 |
| Jendela | 32,9 |
| Pintu Sambungan | 30,6 |
| Lantai | 32,3 |

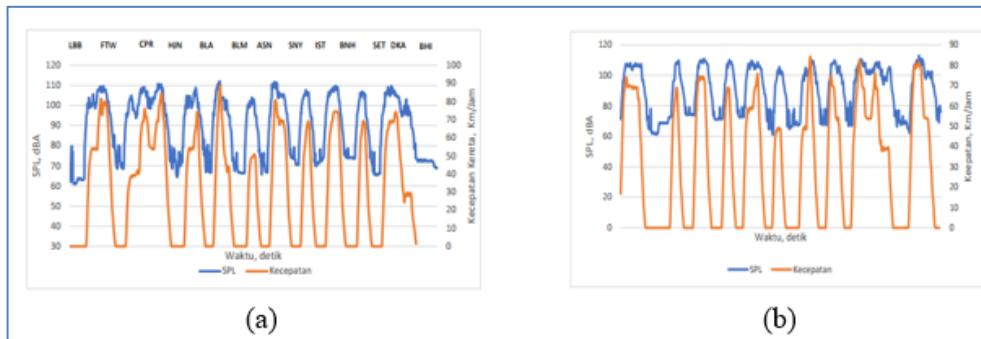
Dari data diatas, dapat dilihat bahwa suara yang masuk ke dalam interior kereta didominasi melalui jalur pintu dibandingkan dengan komponen lainnya.

Indikasi tersebut dianalisa lebih lanjut dengan melihat distribusi tingkat *noise* dalam kereta yang ditunjukan pada Gambar 7.

**Gambar 7.**Distribusi *Noise*

Pengujian dilakukan dengan menempatkan sumber suara pada sisi samping dan bawah kereta. Tingkat *noise* tertinggi bersumber dari bagian bawah dari pintu yang rata-rata 4 dBA lebih tinggi dari area lainnya.

Tingkat *noise* untuk jalur LBB - Bundaran HI (BHI) ataupun sebaliknya berada pada range 99-112 dBA tergantung pada kecepatan kereta. Untuk *area FTM-CPR* memiliki tingkat *noise* hingga 105 dBA di kecepatan rendah sekitar 40 km/h. Hal tersebut dikarenakan keberadaan *curve track* yang menimbulkan *curve squeal noise*.



Gambar 8.

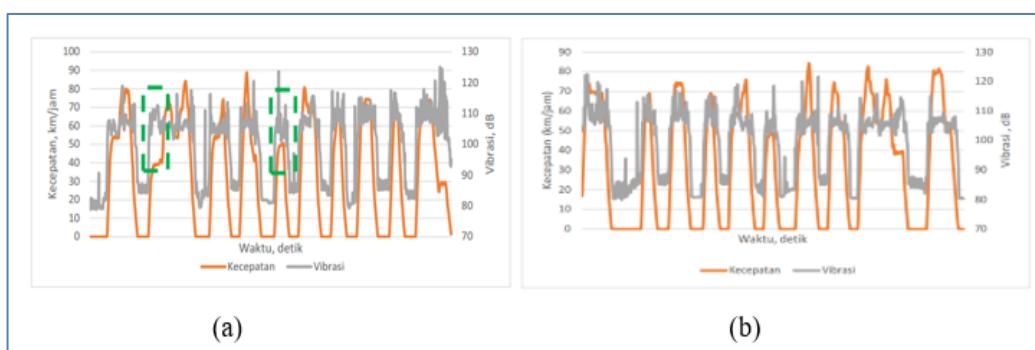
Perbandingan Tingkat Bising *Underfloor*: (a) LBB-BHI, (b) BHI-LBB

Noise dari *area underfloor* dikenal juga dengan *exterior noise*. Profil *exterior noise* tidak memiliki perbedaan yang signifikan antara *area tunnel* dan *elevated*. Hal tersebut terlihat dalam tabel berikut.

Tabel 10.

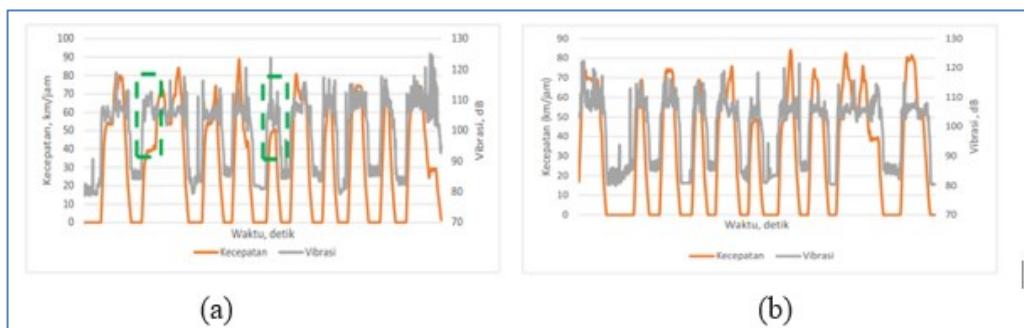
Pengukuran *Eksterior Noise*

| Kecepatan Area | 68 km/h | | 74 km/h | |
|-------------------|----------|--------|----------|--------|
| | elevated | tunnel | elevated | tunnel |
| SPL, dBA | 106,0 | 107,5 | 108,7 | 108,6 |



Gambar 9.

Profil Vibrasi dan Kecepatan Kereta (a) LBB-BHI, BHI-LBB

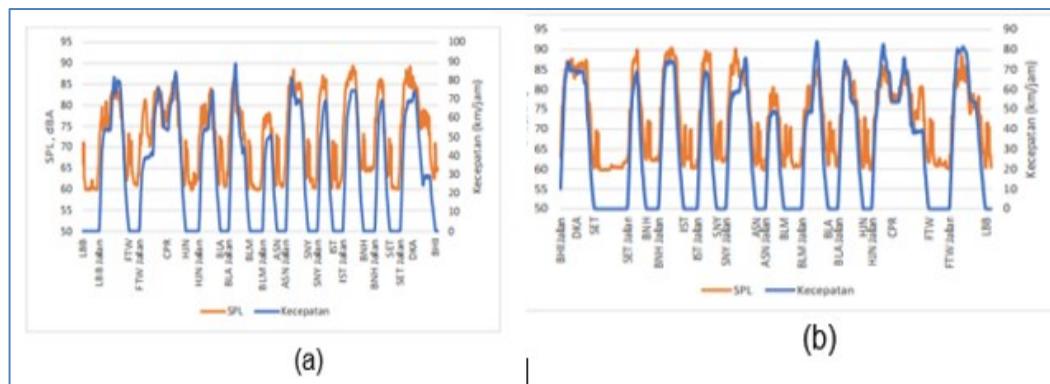


Gambar 10.

Profil Vibrasi dan Kecepatan Kereta (a) LBB-BHI, BHI-LBB

Selain itu dilakukan juga perbandingan tingkat vibrasi dengan tingkat *noise underfloor*. Diperoleh hubungan yang proporsional antara vibrasi dengan tingkat *noise* untuk kecepatan kereta yang relatif sama. Sehingga, *noise* naik seiring dengan naiknya tingkat vibrasi. Hasil ini juga memberikan indikasi pengendalian pada tingkat vibrasi dapat berimplikasi menurunkan *noise*.

Tingkat vibrasi pada *bogie* pada saat melintas di tunnel rata-rata 3 dB lebih tinggi dibandingkan *elevated*. Seperti pada *exterior noise*, tingkat *interior noise* terhubung dengan kecepatan kereta.



Gambar 11.

Tingkat Bising Rata-Rata dalam *Train Set* dan Profil Kecepatan: (a) LBB-BHI,(b) BHI-LBB

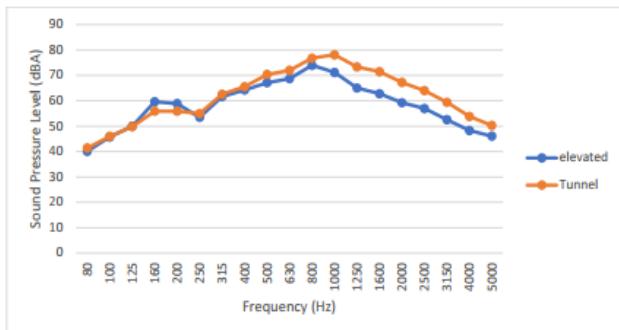
Pada Table 11 ditampilkan tingkat *noise* rata-rata untuk beberapa profil kecepatan dan *track*. Pada kondisi normal *track*, lurus atau relatif lurus, tingkat *noise* dalam *train set* untuk *elevated track* mencapai 83,6 s.d 87,0 dBA untuk kecepatan 68-88 km/h. Sementara itu tingkat bising mencapai 85,0-88,1 dBA untuk lintas dan dalam *tunnel* utk kecepatan maksimum yang lebih rendah yaitu 74 km/h. Dengan demikian, *noise* di bawah 83 dBA dapat diperoleh untuk kecepatan yang lebih rendah. Sementara itu tingkat *noise* 78,0-81,4 dBA ditemukan pada saat kereta melintasi *curve track* pada kecepatan 40-50 km/jam.

Tabel 10.

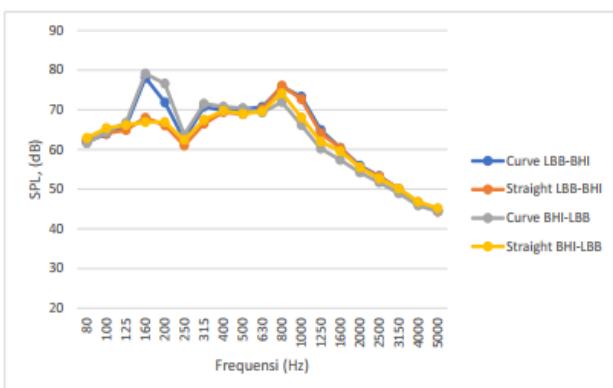
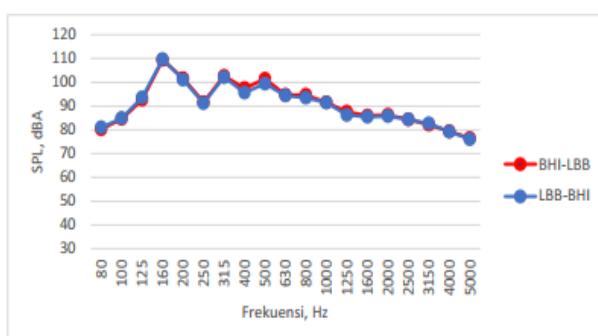
Perbandingan Tingkat Bising dalam *Train Set* untuk Beberapa Kecepatan Karakteristik *Track*

| | <i>Curve Track</i> | <i>Normal Track</i> | |
|------------------|--------------------|---------------------|---------------|
| | | <i>Elevated</i> | <i>Tunnel</i> |
| Kecepatan | 40-50 km/h | 68-88 km/h | 68-74 km/h |
| SPL | 78-81,4 dBA | 83,6-87 dBA | 85-88,1 dBA |
| Kecepatan | | 74 km/h | |
| SPL | | 82,9 dBA | 88,1 dBA |

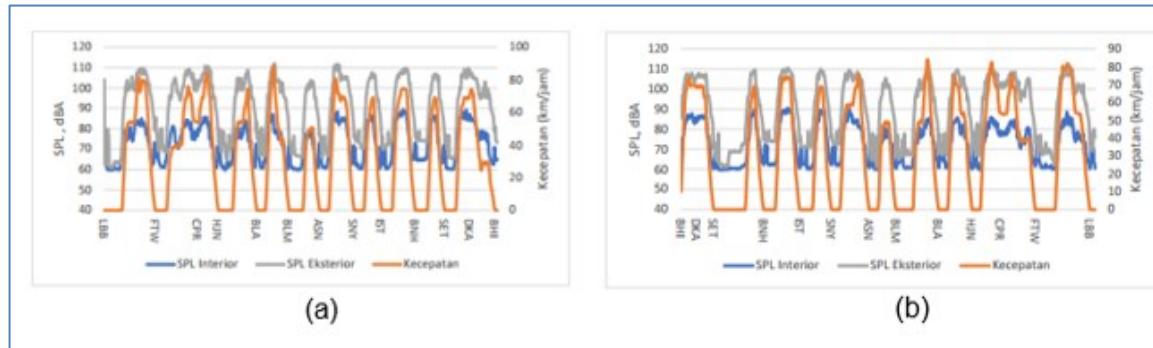
Pada kecepatan yang sama, tingkat *noise* meningkat sekitar 5 dBA pada saat di *elevated*. Peningkatan *noise* ini merupakan kontribusi suara di frekuensi diatas 1 kHz seperti ditunjukkan oleh Gambar 12. Peningkatan *noise* dalam *interior* pada *area tunnel* tidak disebabkan akibat interaksi roda-rel. Hal ini diperkuat oleh data pada kecepatan yang sama tidak terjadi perubahan tingkat *noise* yang signifikan antara *elevated* dan *tunnel*. Dengan mempertimbangkan hasil perbandingan spektrum suara di *elevated* dan *tunnel* maka perubahan level suara lebih didominasi oleh pantulan suara dalam *tunnel* yang bertransmisi melalui dinding dari *train set*.

**Gambar 12.**Perbandingan Spektrum Suara untuk Lintas *Elevated* dan *Tunnel*

Pada saat melintasi *curve track* tidak terjadi peningkatan *noise* secara total namun secara warna suara terjadi perubahan akibat kemunculan komponen suara tonal di 160 Hz seperti ditunjukkan pada Gambar 13. Hal ini berkorelasi dengan *exterior noise* dengan *noise* dominan muncul di frekuensi 160 Hz seperti ditunjukkan pada Gambar 14. Pada kondisi ini *rolling noise* berkurang karena kecepatan kereta turun pada saat melintasi *track* ini.

**Gambar 13.**Perbandingan Spektrum Suara dalam Kereta Saat di *Curve* dan *Lurus***Gambar 14.**Spektrum Suara Eksterior di *Area Curve*

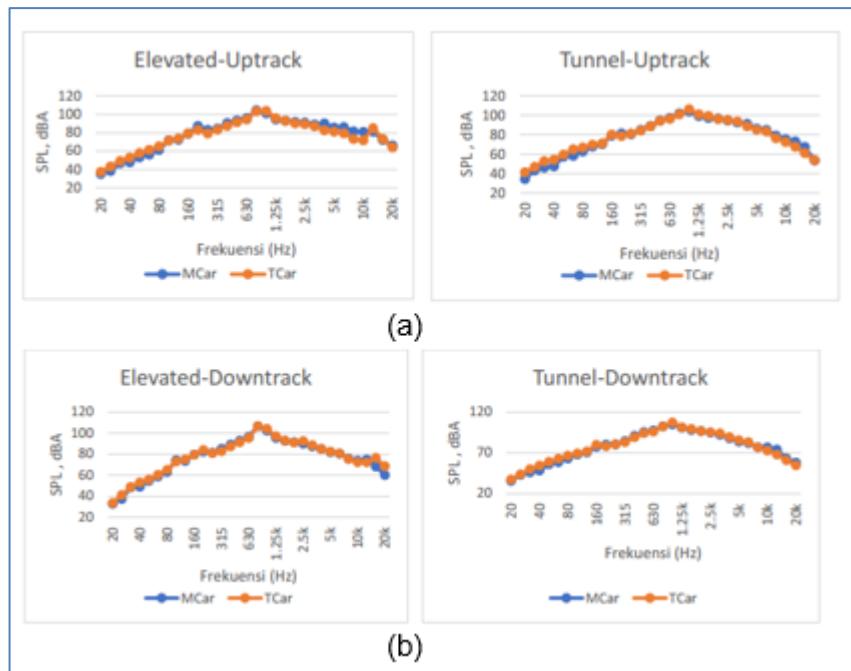
Dilakukan juga perbandingan antara karakteristik interior *noise* dengan *exterior noise*. Pada Gambar 15, profile *noise* yang terbentuk di interior berkorelasi tinggi terhadap eksterior *noise*.



Gambar 15.

Perbandingan SPL Interior dan Eksterior Kecepatan Normal

Untuk mengetahui kontribusi *noise* dari sistem propulsi dilakukan juga perbandingan antara Motor *Car* (M)2 dan *Trailer Car* (TC)1 dan tidak ditemukan perbedaan yang signifikan antara keduanya. Hal ini menunjukkan *noise* akibat interaksi roda dan rel dominan disemua *car* seperti pada Gambar 16 di bawah ini.



Gambar 16.

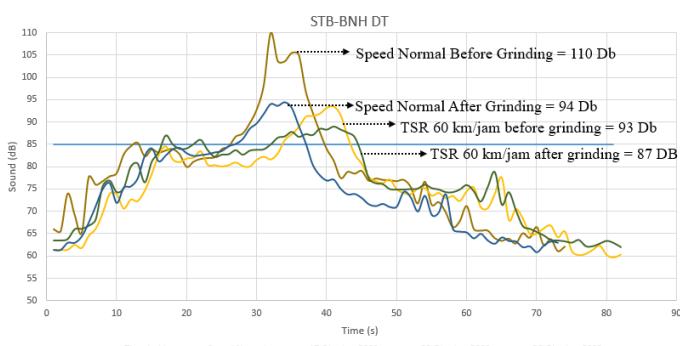
Perbandingan Noise Eksterior antara M dan Tc: (a) LBB-FTM, (b) Istora (IST)-BNH

Pada Gambar 16(a), ditampilkan perbandingan spektrum bising eksterior saat di *elevated* dan *tunnel* pada kecepatan 70 km/h terjadi kenaikan sekitar 5 dB pada saat melintas di *area tunnel* untuk frekuensi diatas 1 kHz, lebih tinggi dibandingkan dengan interior *noise* di rentang frekuensi yang sama mencapai 12 dB.

Pada frekuensi yang lebih rendah, 200-600 Hz juga terjadi kenaikan *noise* sebesar 5 dB saat melintas di *tunnel*. Tren tersebut juga ditemukan pada kecepatan yang lebih tinggi. Hal tersebut mengindikasikan interior *noise* juga didominasi oleh *noise* dari pantulan dinding *tunnel* yang kemudian berpropagasi ke dalam kereta.

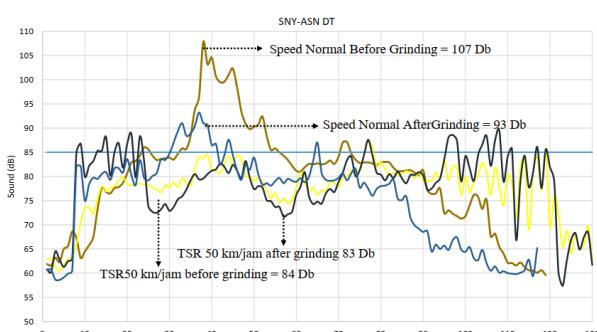
**Gambar 17.**Perbandingan Noise Interior dan Eksterior di *Elevated* dan *Tunnel*: (a) 70kmh, (b) 74 kmh

Kemudian dilakukan pengujian dengan pembatasan kecepatan dan *grinding* oleh tim Direktorat Operasi dan Pemeliharaan. *Trial run* dilakukan dengan variable kecepatan normal, pembatasan kecepatan 60 km/h, dan pembatasan kecepatan 50 km/h. Selain itu juga dilakukan *trial* setelah dilakukan *grinding* menggunakan *rail grinding machine* pada petak STB-BNH dan SNY-ASN. Dari hasil pengujian didapatkan data sebagai berikut:

**Gambar 18.**

Hasil Pengujian Noise di STB-BNH Downtrack

Pada Gambar 18 terlihat bahwa pembatasan kecepatan 60 kmh berhasil menurunkan level *noise* sekitar 17 dB. Begitupun dengan *grinding* yang dilakukan berhasil menurunkan *noise* sekitar 13 dB. Apabila kedua metode tersebut dikombinasikan dapat menurunkan *noise* hingga 23 dB.

**Gambar 19.**

Hasil Pengujian Noise di SNY-ASN Downtrack

Begitupun pada area SNY-ASN *downtrack* yang diuji dengan pembatasan kecepatan 50 kmh, level *noise* bahkan turun sekitar 23 dB. Apabila dikombinasikan dengan *grinding* turun sebanyak 24 dB. di rentang frekuensi yang sama mencapai 12 dB.

Dari kedua data diatas, dapat dilihat bahwa pembatasan kecepatan memberikan hasil yang sangat efektif dengan mampu menurunkan tingkat *noise*. Namun juga perlu dipertimbangkan terkait dengan waktu tempuh antar stasiun agar tidak mengganggu kelancaran operasional. Metode *grinding* juga terbukti sangat efektif dalam menurunkan tingkat *noise* itu sendiri. Kombinasi dua metode tersebut dapat menjadi solusi dalam penanganan *noise* yang efektif.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

- Berdasarkan data hasil simulasi, faktor *roughness*/kekasaran dari rel berbanding lurus dengan *sound pressure level*. Semakin tinggi angka kekasarnya, maka semakin tinggi pula *sound pressure*-nya.
- Penggunaan *trackbase* juga memengaruhi *sound pressure* yang dihasilkan. *Bi-block sleeper* dengan menggunakan *hard rail pad* menurunkan tingkat tekanan suara 3,9-4,4 dBA dibandingkan kondisi normal.
- Penggunaan *composite brake* dan *disc brake* juga memberikan efek yang signifikan dalam menekan tingkat *sound pressure* sekitar 4-5,5 dBA.
- Hasil pengujian dengan pembatasan kecepatan 50 kmh dan 60 kmh berhasil menurunkan tingkat *noise* yang sangat signifikan masing-masing 23 dB dan 17 dB.
- Dan hasil pengujian dengan menggunakan *grinding* pada rel yang mengalami korugasi juga berhasil menurunkan *noise* hingga 23 dB.
- Direkomendasikan untuk dilakukan proses *grinding* pada area yang terindikasi terjadi korugasi.
- Diperlukan studi lebih lanjut terkait dengan pengaruh perubahan batas kecepatan terutama kaitannya dengan kelancaran operasional MRT Jakarta.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. David Thompson. (2009). *Railway Noise and Vibration: Mechanism, Modelling, and Means of Control*. (pp. 1-518).
2. ISO 3095. (2013). *Railway Applications - Acoustics - Measurement of Sound Emitted by Rail bound Vehicles*. Switzerland: International Organization for Standardization (pp. 1-9).
3. Muhammad Ishaq Arya Suluh, Arif Rahmat, Hadi Sutanto. (2024). Korelasi antara Kekasaran Permukaan Rel dan Tingkat Kebisingan di dalam Kereta MRT Jakarta. <https://doi.org/10.25170/jpk.v1i03.6352>
4. Verheijen, Edwin, Van Beek, Annemarie. (2019). *Clarifications and Refinements to Squeal Noise in CNOSSOS*. (pp. 1990-1997).
5. Zdenka Popović, Milica Mićić, Luka Lazarević. (2022). Guidelines for Rail Reprofiling. *Transportation Research Procedia* 63: 2562-2570.