

Korelasi Antara Kekasaran Permukaan Rel dan Tingkat Kebisingan di Dalam Kereta MRT Jakarta

Muhammad Ishaq Arya Suluh^{1*}, Arif Rahmat², Hadi Sutanto¹

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

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

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i> Received 06 Desember 2024 Accepted 18 December 2024 <i>Keywords:</i> <i>Rail Roughness, Rolling noise, MRT Jakarta, ISO 3095, ISO 3381.</i>	This study analyses the rail <i>roughness</i> of the Jakarta MRT system and its impact on interior noise in trains. The interaction between the wheels and the rails, especially the surface <i>roughness</i> , plays an important role in the formation of noise, known as rolling noise. This study aims to measure the rail <i>roughness</i> using the CAT Corrugation measuring instrument and analyse the relationship between rail <i>roughness</i> and noise levels using ISO 3095 and ISO 3381 standards. The results show that noise levels increase with increasing rail <i>roughness</i> . Mitigation of <i>roughness</i> at certain wavelengths can reduce noise, focusing on the range of 400 Hz to 2500 Hz. Recommendations for rail maintenance to maintain <i>roughness</i> in accordance with ISO standards can help reduce the impact of noise on passenger comfort in trains.

Info Artikel	Abstrak
<i>Histori Artikel:</i> Diterima: 06 Desember 2024 Disetujui: 18 Desember 2024 <i>Kata Kunci:</i> <i>Kekasaran rel, Rolling noise, MRT Jakarta, ISO 3095, ISO 3381</i>	Penelitian ini menganalisis kekasaran rel pada sistem MRT Jakarta dan dampaknya terhadap kebisingan interior kereta. Interaksi antara roda dan rel, khususnya kekasaran permukaan, berperan penting dalam pembentukan kebisingan, yang dikenal sebagai <i>rolling noise</i> . Penelitian ini bertujuan untuk mengukur kekasaran rel dengan menggunakan alat ukur Korugasi CAT dan menganalisis hubungan antara kekasaran rel dan tingkat kebisingan menggunakan standar ISO 3095 dan ISO 3381. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kebisingan meningkat seiring dengan peningkatan kekasaran rel. Mitigasi terhadap kekasaran pada panjang gelombang tertentu dapat mengurangi kebisingan, dengan fokus pada rentang 400 Hz hingga 2500 Hz. Rekomendasi untuk perawatan rel guna mempertahankan kekasaran yang sesuai dengan standar ISO dapat membantu mengurangi dampak kebisingan terhadap kenyamanan penumpang di dalam kereta.

1. PENDAHULUAN

Kebisingan pada kereta (*Railway Noise*) berhubungan dengan vibrasi dan suara dari komponen-komponen yang terkait dengan sistem sarana dan prasarana, dalam hal ini adalah rail track dan unit train set. Dalam prakteknya, mekanisme pembangkitan suara banyak berhubungan dengan interaksi roda dari train set dan sistem rail yang memicu terjadinya vibrasi, yang kemudian menghasilkan suara dengan Tingkat intensitas yang tinggi. Kondisi ini dapat menjadi sumber bising terhadap lingkungan dimana kereta beroperasi maupun penumpang kereta ketika insulasi akustik tidak memadai. Vibrasi yang terjadi dari interaksi rel dan roda kereta meningkat dengan seiring meningkatnya kekasaran (*roughness*) dari kedua komponen tersebut sebagai konsekuensi dari operasional kereta. sebagai gambaran,

*Corresponding author. Muhammad Ishaq Arya Suluh
Email address: m.ishaq.as@gmail.com

kekasaran rel dengan profil 50 μm (max-min) dan panjang gelombang (wavelength) 50 mm dapat menghasilkan kecepatan vibrasi 0.11 m/s atau 494 m/s² pada kecepatan operasi 90 km/jam. Kebisingan yang dihasilkan oleh interaksi ini dikenal sebagai rolling noise, dengan kontribusi utama dari rel pada frekuensi 500 Hz – 1200 Hz, bantalan pada frekuensi rendah (<500 Hz), dan roda pada frekuensi tinggi (>2000 Hz). Untuk mengurangi kebisingan, pengendalian kekerasan rel dan roda dapat dilakukan, yang tidak hanya meningkatkan kenyamanan penumpang, tetapi juga mengurangi dampak kebisingan terhadap lingkungan. Selain itu, pemantauan kekasaran rel juga penting untuk menjaga kualitas infrastruktur, mengurangi biaya perawatan, dan meningkatkan keamanan operasional kereta.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekasaran rel pada sistem MRT Jakarta dan dampaknya terhadap tingkat kebisingan interior sarana MRT Jakarta, dengan tujuan spesifiknya adalah mengumpulkan data kekasaran rel untuk memperoleh data kekasaran rel pada jalur MRT yang telah beroperasi, guna memahami kondisi kekasaran rel yang mempengaruhi tingkat kebisingan. Analisis karakteristik kekasaran rel dengan cara melakukan analisis terhadap karakteristik kekasaran rel sesuai dengan ISO 3381 (2005) serta data pengukuran tingkat kebisingan yang terukur di lapangan pada setiap area yang memiliki tingkat kebisingan diluar standar, untuk mengidentifikasi hubungan antara kekasaran rel dan tingkat kebisingan. Mendapatkan rekomendasi perawatan rel untuk upaya perawatan rel untuk menjaga kekasaran rel pada tingkat kekasaran yang sesuai dengan ISO 3381, sehingga kebisingan dalam interior kereta dapat memenuhi tingkat kenyamanan yang dibutuhkan bagi penumpang. Penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu dicatat, yaitu lokasi pengukuran kekasaran rel yang terbatas pada lintas jalur tertentu yang memiliki tingkat kebisingan paling tinggi. Parameter yang mempengaruhi kekasaran rel yaitu beban kereta, jumlah as roda, tingkat kekasaran roda, dan konfisi infrastruktur rel. Karakteristik kekasaran rel yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan hasil pengukuran langsung di lapangan. Rentang panjang gelombang akustik yang diukur pada rentang gelombang akustik antara 500 mm – 3.15 mm. Kekasaran diluar rentang tersebut tidak dianalisis, karena tidak berdampak signifikan terhadap tingkat kebisingan yang relevan dengan kenyamanan penumpang. Simulasi kebisingan kereta, yang mengacu pada pengaruh kekasaran rel terhadap tingkat kebisingan di interior kereta.

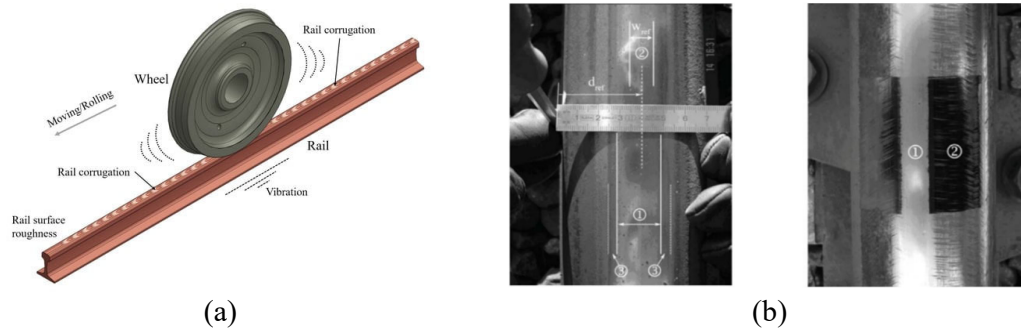
2. METODE PELAKSANAAN

2.1. Kebisingan di dalam Kereta MRT Jakarta

Kebisingan adalah suara yang tidak diinginkan atau mengganggu, yang dapat menyebabkan gangguan pada pendengaran atau kenyamanan seseorang. Kebisingan sering kali berasal dari sumber-sumber seperti mesin, kendaraan, alat-alat listrik, musik keras, dan kegiatan lainnya yang menghasilkan suara dengan volume tinggi atau tidak teratur. Kebisingan dapat mempengaruhi kualitas hidup, mengganggu konsentrasi, dan bahkan berdampak buruk pada kesehatan. Pada kasus ini kebisingan terjadi di dalam kereta MRT Jakarta yang melebihi dari standar dan peraturan yang ditetapkan. Kebisingan yang terjadi disebabkan oleh kebisingan kontak roda dengan rel saat kereta beroperasi melintasi jalur kereta atau biasa disebut dengan rolling noise. Berikut merupakan poin-poin teknis tentang kebisingan perkeretaapian.

- Sources of rolling noise memiliki tiga faktor yaitu adanya interaksi roda dengan rel, kekasaran permukaan roda dan kekasaran permukaan rel serta bentuk dan material dari roda kereta.

- Rentang frekuensi rolling noise berada dalam rentang frekuensi rendah, biasanya di bawah 1 kHz, namun dapat mencakup komponen pada frekuensi yang lebih tinggi tergantung pada faktor-faktor seperti kecepatan dan kondisi rel. Hal ini dikarenakan karena meningkatnya interkasi antara roda dengan rel seiring bertambahnya kecepatan operasi kereta, yang bisa meningkatkan *amplitudo rolling noise*.
- Geometri rel dan desain kereta
- Faktor lingkungan dan struktural, seperti pantulan dari struktur sekitar, seperti terowongan atau bangunan yang dapat meningkatkan tingkat kebisingan.

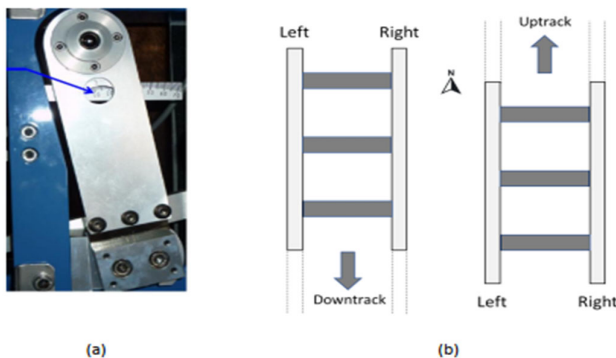


Gambar 1.

Rail Wheel Contact (a), dan definisi dan penentuan W_{ref} dan d_{ref} pada masing-masing permukaan rel untuk mendapatkan posisi sensor CAT dengan menggunakan metoda surface marking

2.2. Metode Pengukuran

Karakteristik bising operasional MRT Jakarta dianalisis menggunakan pemodelan dan simulasi berbasis CNOSSOS-EU. Simulasi ini menggunakan data kekasaran rel yang diukur sebagai input utama, sementara parameter lainnya disesuaikan dengan kondisi infrastruktur rel dan kereta. Adapun metode pengukuran batas kekasaran rel pada jalur MRT Jakarta dilakukan menggunakan alat ukur korugasi CAT dengan beberapa tahapan yaitu pengambilan *surface marking* pada rel (Gambar 1a) kemudian penentuan posisi sensor alat ukur korugasi CAT (Gambar 1b) yang dilanjut dengan membandingkan hasil pengukuran dengan standar kekasaran rel acuan yang terdapat pada ISO 3095 (2005) dan ISO 3381 (2005). Kedua standar ini digunakan untuk mengukur kebisingan yang dihasilkan oleh interkasi antara rel dengan roda kereta, dengan ketentuan bahwa kekasaran rel pada standar tersebut juga berlaku sebagai batas acuan kebisingan yang dipancarkan oleh sistem rel.



Gambar 3.

Pengubahan Posisi sensor CAT sesuai dengan nilai W_{ref} (a), dan d_{ref} Ilustrasi (*topview*) mengenai penamaan *left* dan *right rail* dengan referensi arah utara atau *uptrack* (b).

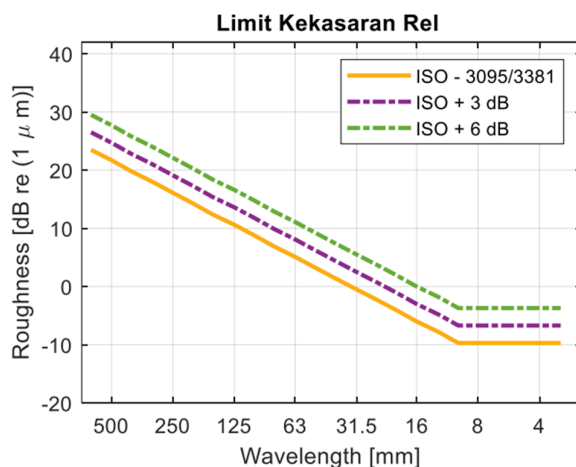
Dalam penelitian ini, batas kekasaran rel dalam kedua standar tersebut digunakan sebagai pembanding untuk mengetahui “*roughness severity*” dari *rail track* MRTJ. Meskipun demikian, beberapa catatan terkait batas kekasaran rel dalam ISO 3095/3381:

- ISO 3095/3381 (2005) merupakan standar untuk mengukur *noise train set / rail bound vehicle* dengan prasarana yang dikhususkan untuk pengujian, bukan *rail track* untuk operasional. Sehingga pada ISO ini diatur mengenai rel acuan yang digunakan untuk membandingkan bising yang diemisikan oleh kereta baik ke lingkungan maupun di dalam trail set, sehingga kondisi pengujian berada pada keadaan rel yang sama.
- 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.

Untuk *rail track* operasional, tingkat kekasaran rel yang dapat diterima dipengaruhi oleh dua faktor utama: tingkat kebisingan yang dapat diterima dan kecepatan operasional. Batas kekasaran rel yang dianggap halus atau “*smooth track*” sesuai dengan ISO 3095 (2005) adalah batas yang dapat memberikan tingkat kebisingan yang memadai. Kekasaran rel yang terukur pada lintasan yang diuji tidak boleh melebihi batas yang ditetapkan oleh ISO, dengan toleransi kecil yang diperbolehkan pada variasi kekasaran. Batas kekasaran rel dapat dianggap masih dalam kriteria ISO 3095/3381 (2005) meskipun ada sedikit pelampauan pada beberapa *band wavelength*, dengan ketentuan sebagai berikut:

- Satu *band* kekasaran rel antara *wavelength* 10 mm hingga 80 mm dapat melebihi batas maksimum hingga 6 dB (ISO +6 dB).
- Tiga *band* kekasaran rel berturut-turut antara *wavelength* 10 mm hingga 80 mm dapat melebihi batas maksimum hingga 3 dB (ISO +3 dB).
- Kombinasi kedua kondisi tersebut juga diperbolehkan.
- Kekasaran rel di luar *band wavelength* 10 mm hingga 80 mm, seperti pada *wavelength* 8 mm, tidak boleh melebihi batas acuan.

Adapun lokasi-lokasi lintas jalur yang dilakukan pengukuran sesuai pada Tabel 1, yang kemudian dilakukan analisis data limit kekasaran rel sesuai dengan ISO 3095 (2005) dan ISO 3381 (2005).



Gambar 4.

Limit Kekasaran Rel Sesuai dengan ISO 3095 (2005) dan ISO 3381 (2005)

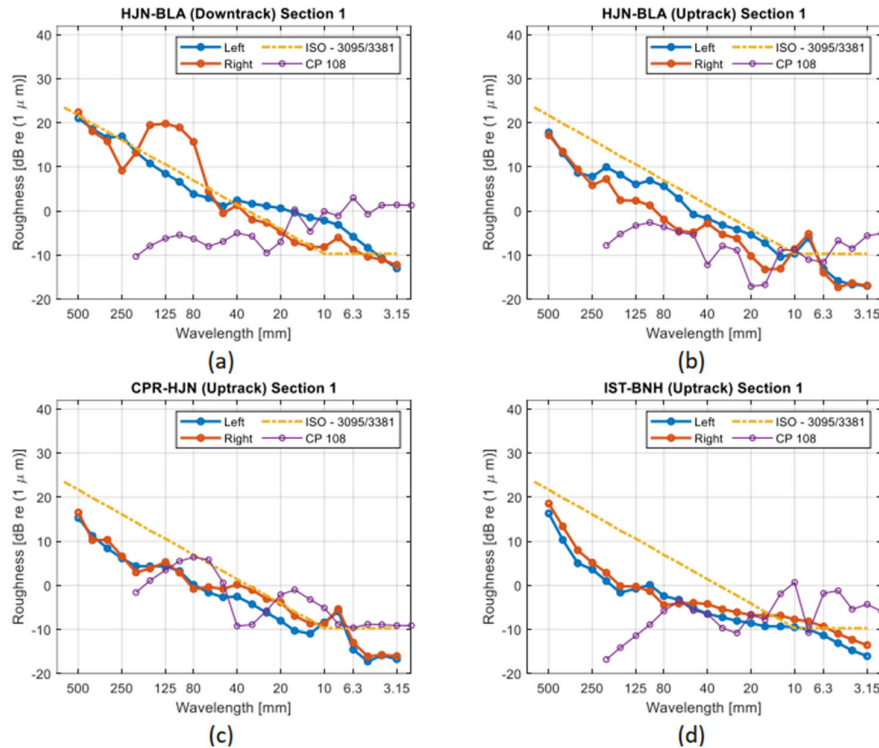
Tabel 1.

Lokasi Sesor CAT untuk setiap lokasi di lintas jalur MRT Jakarta menurut EN 15610 (2009)

No	Lokasi	Rail	W_{ref} (mm)	d_{ref} (mm)	Extra d_{ref} (mm)
1	LBB-FTM	Left	31	34.5	24.5; 44.5
		Right	45	22.5	12.5; 32.5
2	CPR-HJN	Left	24	34	24; 34
		Right	26	34	24; 44
3	HJN-BLA	Left	35	29.5	19.5; 39.5
		Right	31	34.5	24.5; 44.5
4	HJN-BLA	Left	32	29	19; 39
		Right	23	38.5	28.5; 48.5
5	IST-BNH	Left	24	32	24; 44
		Right	24	32	22; 42
6	STB-BNH	Left	17	37.5	--
		Right	40	20	10; 30

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran kekasaran rel saat ini dibandingkan dengan hasil pengukuran yang terdapat pada laporan CP 108 untuk lokasi, HJN – BLA (*Up Track* dan *Down Track*), CPR – HJN (*Up Track*), IST – BNH (*Up Track*) – lihat Gambar 5. Berdasarkan data pengukuran SPL (*Sound Pressure Level*) dari tahun 2018 – 2021, tingkat bising cenderung naik sebesar 1.9 dBA s.d 4.5 dBA. Dari hasil pengukuran, kekasaran rel untuk setiap lokasi tidak memenuhi kriteria bila mengacu pada ISO 3095/3381.

**Gambar 5.**

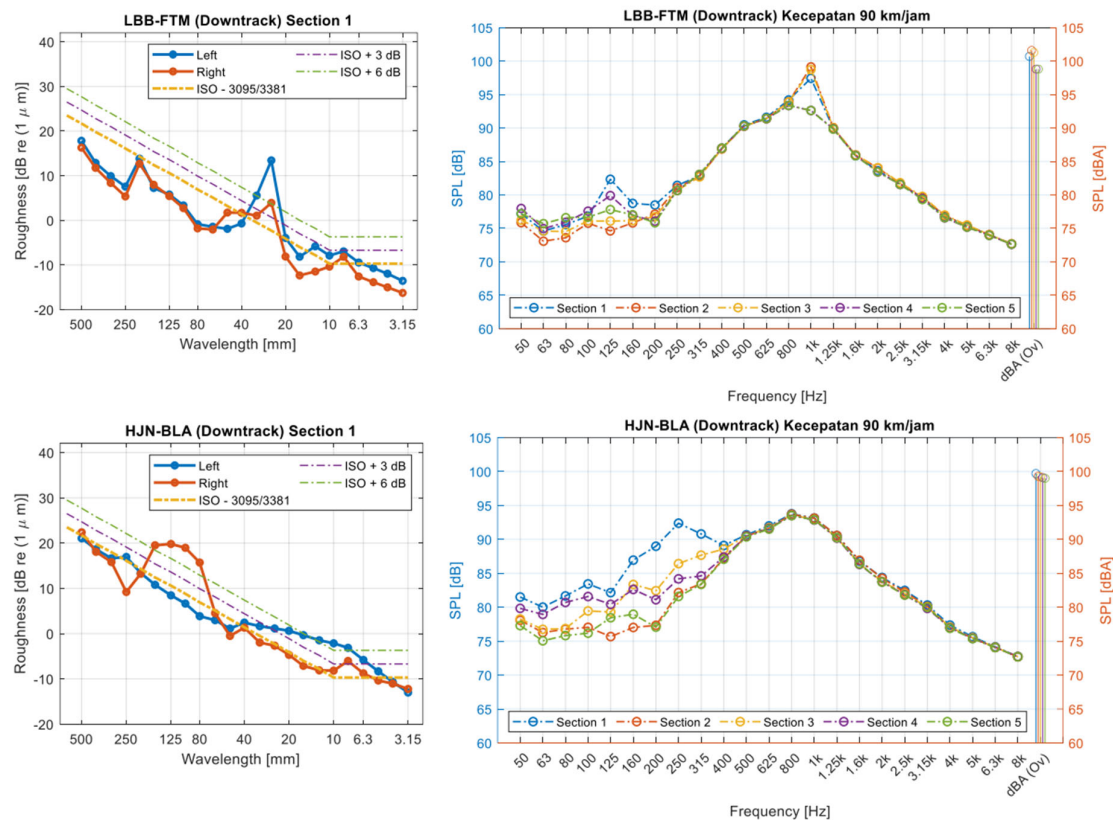
Keadaan kekasaran rel dibandingkan dengan pengukuran CP 108 di Section 1 Lokasi: (a) HJN-BLA (Downtrack), (b) HJN-BLA (Uptrack), (c) CPR-HJN (Uptrack), dan (d) IST-BNH (Uptrack).

Tabel 2.

Histori data tingkat bising di lokasi pengukuran kekerasan rel

Lokasi	Laporan CP108 (2018)	Laporan CP108 (2019)	Laporan ITB (2020)	Laporan MRTJ (2021)
LBB - FTM	83.4	81.7	82.5	87.0
CPR – HJN	86.5	83.0	84.1	87.6
HJN – BLA	85.5	81.0	79.0	83.7
HJN – BLA	81.0	77.0	80.6	78.8
IST – BNH	91.6	85.4	88.0	89.6
BNH – STB	87.0	82.5	85.5	89.2

Berdasarkan spektrum bising yang terukur, *rolling noise* merupakan sumber kebisingan yang paling dominan, dengan komponen utama pada frekuensi 900 Hz – 1 kHz. Kontribusi kekasaran rel terhadap keseluruhan kebisingan sangat signifikan. Simulasi menunjukkan bahwa penurunan kekasaran rel sebesar 2 dB – 6 dB dapat mengurangi SPL sebesar 1.8 dBA – 5.5 dBA pada kecepatan operasional kereta yang sama. Meskipun beberapa lokasi memiliki kekasaran rel di bawah batas ISO 3095/3381 (2005). Tidak semua kekasaran rel mempengaruhi kebisingan utama pada sekitar 1 kHz. Pada kasus LBB-FTM (*Downtrack*), kekasaran rel di panjang gelombang 25 mm berkontribusi pada puncak di 1 kHz, sementara pada HJN-BLA (*Downtrack*), kekasaran di panjang gelombang 250 mm – 50 mm berkontribusi pada frekuensi rendah (<400 Hz).

**Gambar 6.**

Kontribusi spektrum kekasaran rel terhadap spektrum SPL kebisingan

Penurunan SPL *rolling noise* akan mengurangi tingkat kebisingan keseluruhan. Oleh karena itu, perhatian harus difokuskan pada kekasaran rel pada *wavelength* 10 mm – 63 mm, yang berhubungan dengan frekuensi SPL 400 Hz – 2500 Hz pada kecepatan maksimum 90 km/jam. Kekasaran rel di luar rentang tersebut dapat ditangani dengan kriteria berbeda. Pada 2021, tingkat kebisingan tercatat 78 – 89 dBA, meningkat 2 -5 dBA dibandingkan pada tahun 2020. Peningkatan ini terkait dengan kenaikan kekasaran rel antara 2 dB hingga 6 dB berdasarkan ISO 3095/3381.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Tingkat kekasaran rel di MRT Jakarta pada beberapa lokasi melebihi batas yang dianjurkan di dalam ISO 2095/3381 (2005), namun kriteria dapat diperinci lebih lanjut dengan mempertimbangkan mitigasi *rolling noise* pada frekuensi 400 Hz hingga 2000 Hz. Beberapa lokasi, seperti CPR-HJN (Up Track) dan HJN – BLA (UP Track), masih memenuhi kriteria yang ditetapkan. Pada *rail track* dengan radius besar (>1000 m), kekasaran lebih tinggi pada *wavelength* <10 mm, tetapi lebih rendah pada *wavelength* >10 mm dibandingkan dengan batas ISO. Sebaliknya, untuk radius kecil, kekasaran rel melebihi 6 dB pada *wavelength* 20-40 mm di beberapa lokasi, dengan karakteristik berbeda antara rel kanan dan kiri. Perbandingan dengan data kontraktor CP 108 menunjukkan adanya kenaikan kekasaran pada *wavelength* >10 mm, namun untuk *wavelength* <10 mm, kekasaran rel di CP 108 lebih tinggi. Kekasaran pada *wavelength* 10-80 mm perlu penanganan khusus karena kontribusinya terhadap *rolling noise*. Penanganan kekasaran pada *rail track* dengan radius kecil memerlukan studi dan simulasi lebih lanjut untuk menentukan spesifikasi yang lebih ditel.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. ISO 3095. (2013). *Railway Applications - Acoustics - Measurement of Sound Emitted by Rail bound Vehicles*. Switzerland: International Organization for Standardization.
2. ISO 3381. (2021). *Railway Applications - Acoustics – Noise Measurement inside Rail bound Vehicles*. Switzerland: International Organization for Standardization.
3. Popović, Z., Mičić, M. & Lazarević, L. (2022). Guidelines for Rail Reprofileing. *Transportation Research Procedia* 63, 2562-2570.
4. Peng., H., Yao, Y., Cai, X., Zhong, Y., & Sun, T. (2021). Field Measurement Analysis and Control Measures Evaluation of Metro Vehicle Noise Caused by Rail Corrugation. *Applied Science*, 11, 11190.
5. Thompson, D.J. (2008). *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Netherland: Elsevier.
6. Vincent, N., Bouvet, P., Thompson, D.J., & Gautier, P.E. (1996). Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 193, 161– 171.