

Prediksi Usia Operasi Rel Lengkung Terhadap *Rolling Contact Fatigue*

Prediction of Operating Life of Curved Rail Towards Rolling Contact Fatigue

Davin Eka Prakasa^{1*}

¹Program Studi Rekayasa Infrastruktur dan Lingkungan, Fakultas Teknik Transportasi dan Logistik,
Institut Transportasi dan Logistik Trisakti, Jln. IPN No.2, Cipinang Besar Selatan,
Jakarta Timur 13410, Indonesia

*Email Korespondensi: daviakasa@gmail.com

Abstract

Curved based on Regulation of the Minister of Transportation No. 60 of 2012 Concerning Railway Track Technical Requirements has a minimum radius of 200 m, but in certain cases the curve radius can be planned to be less than the written regulations with special provisions. One of the track locations on the MRT Jakarta operating route has a radius of around 180 m, which is very interesting to discuss, especially in terms of wear which may occur greater than curves with a radius that meets the requirements in written regulations. Analysis of rail wear related to rail service life will be the main discussion. Passing tonnage will be the independent variable and time period will be the dependent variable which has the final result that the rail can still be used for at least the next 6 years.

Keywords: *MRT Jakarta, rolling contact fatigue, wear, rail life, forecasting methode.*

Abstrak

Lengkung berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api memiliki batas minimum dengan radius 200 m namun pada kasus tertentu radius lengkung dapat direncanakan kurang dari peraturan tertulis dengan ketentuan khusus. Salah satu lokasi lintasan pada jalur operasi MRT Jakarta memiliki radius sekitar 180 m dimana hal itu menjadi sangat menarik untuk dibahas terutama dalam hal keausan yang mungkin terjadi lebih besar dibanding lengkung dengan radius yang memenuhi syarat dalam peraturan tertulis. Analisis keausan rel yang terkait dengan masa pakai rel akan menjadi pembahasan utama. *Passing tonnage* akan menjadi variabel independen dan periode waktu akan menjadi variabel dependen yang memiliki hasil akhir bahwa usia pakai rel masih dapat digunakan setidaknya hingga 6 tahun kedepan.

Kata kunci : *MRT Jakarta, rolling contact fatigue, keausan, masa pakai rel, metode forecasting.*

A. Pendahuluan

Rel merupakan salah satu bagian penting dalam prasarana kereta untuk mendukung dan memandu kereta bergerak dengan aman dan lancar. Prasarana transportasi kereta api menurut Peraturan Pemerintah Nomor 56 Tahun 2009 Tentang Penyelenggaraan Perkeretaapian, terdiri dari jalur kereta api, stasiun kereta api, dan fasilitas operasi kereta api agar kereta api dapat dioperasikan. Jalur kereta api adalah jalur yang terdiri atas rangkaian petak jalan rel yang meliputi ruang manfaat jalur kereta api, ruang milik jalur kereta api, dan ruang pengawasan jalur kereta api, termasuk bagian atas dan bawahnya yang diperuntukan bagi lalu lintas kereta api. Prasarana di MRT Jakarta merupakan bagian penting untuk mendukung kelancaran operasional dengan prasarana yang memadai, kereta api dapat beroperasi dengan kecepatan yang lebih tinggi dan mampu mengangkut penumpang dengan kapasitas yang lebih besar. Jalur kereta api dalam hal ini adalah rel yang harus dipelihara dengan baik sesuai standar yang telah ditetapkan hal ini dapat meningkatkan efisiensi transportasi memungkinkan kereta api untuk bergerak dari satu tempat ke tempat lainnya dengan lancar dan cepat.

Rel kereta api mengalami penurunan plastis ketika mengalami pembebanan kereta yang berulang-ulang. Hal ini dapat berbeda di sepanjang lintasan dan profil rel merupakan parameter kunci ketika menjadwalkan operasi pemeliharaan lintasan (Charoenwong et al., 2022). Sesuai kondisi bergerak di jalur datar, beban gandar kereta memiliki pengaruh yang kecil terhadap perilaku *rolling contact fatigue* (RCF) rel roda (Ding et al., 2023). Cacat rel akibat RCF dan keausan merupakan fenomena penting dan masalah serius bagi perkeretaapian di seluruh dunia, RCF dan keausan sangat mempengaruhi umur rel. Oleh karena itu, prediksi fenomena tersebut adalah kebutuhan saat ini untuk menyusun jadwal pemeliharaan yang tepat (Anis et al., 2018). Selain itu, gaya vertikal dan gaya lateral juga dapat berpengaruh dalam pembentukan cacat RCF dapat timbul akibat beban kereta dan perilaku dinamis kereta saat melewati tikungan berinteraksi antara roda dan rel. Selain itu, gaya traksi untuk penggerak dan pengereman kendaraan berinteraksi antara roda dan rel secara longitudinal (Ishida, 2018). Terdapat juga risiko pengelasan menyebabkan cacat material dan mengubah sifat material rel (Kabo et al., 2019).

Penilaian struktur rel yang akurat dalam mengantisipasi pengaruh kelelahan dan korosi mencegah bencana fenomenal, juga menghemat jutaan dolar dan nyawa manusia. (Mahmoodian et al., 2020). Namun, salah satu penyebab utama keausan pada kontak roda-rel adalah hilangnya material akibat proses delaminasi yang berawal dari adanya retakan *fatigue* permukaan (Vicente & Guillamón, 2019). Retakan *fatigue* yang lebih parah

menyebabkan keausan yang lebih parah dan kemudian memperparah keausan memanjang rel yang tidak rata (Zhang et al., 2023). Adanya retakan *fatigue* merupakan pola kerusakan yang umum terjadi pada sistem roda-rel kereta api, sehingga akan mengurangi umur pelayanan dan meningkatkan biaya pemeliharaan angkutan kereta api (Zhou et al., 2023).

Pengelompokan cacat RCF mencakup *spalling*, *shelling*, *squat*, dll. Retakan RCF juga dikenal sebagai *head check* atau retak sudut pengukur ketika terjadi di sudut pengukur rel. Hal ini disebabkan oleh tekanan kontak tinggi yang berulang antara roda dan rel yang timbul dari traksi, pengereman, dan akselerasi. Retakan RCF dapat dianggap sebagai jenis retakan pemecah permukaan (Zhu et al., 2021). Tekanan kontak maksimum pada material rel berawal terjadi pada bagian tepi depan indentasi, kemudian berpindah ke tepi belakang dengan nilai yang semakin besar (Liu et al., 2023). Pada sistem perkeretaapian angkut berat, pengalaman gaya traksi rel yang tinggi pada jalur melengkung secara signifikan mempercepat pertumbuhan retak kelelahan kontak gelinding. Tingkat keseluruhan gaya traksi dan distribusi detailnya dalam bidang kontak dapat ditentukan oleh tingkat slip roda dalam berbagai arah, yang juga disebut sebagai rambat (Wu et al., 2023).

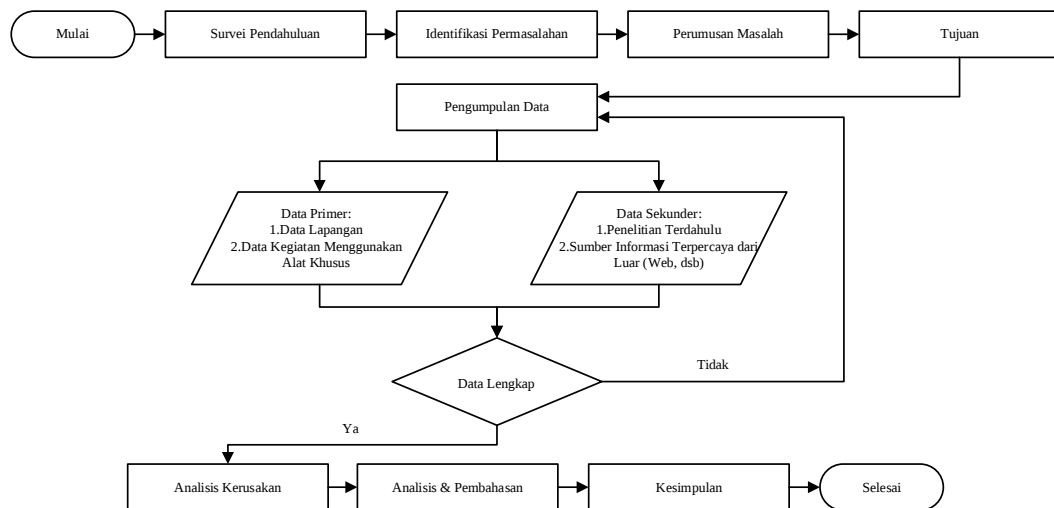
Bentuk kerusakan yang paling umum pada rel kereta, yaitu keretakan rel kereta api, mempunyai banyak dampak buruk dalam hal getaran kendaraan dan kebisingan interior. Sehingga mempengaruhi kenyamanan pengemudi dan berpotensi menghambat keselamatan pengoperasian kereta (Dong et al., 2023). Masalah dalam meningkatkan intensitas keausan flensa roda pada *rolling stock* dan permukaan pengukur sangatlah akut sehingga terdapat risiko hilangnya efisiensi sejumlah bagian karena alasan ini (Kurhan et al., 2020).

Berdasarkan *review* literatur hasil penelitian tersebut diatas, tujuan penelitian ini lebih ditekankan pada efek *Rolling Contact Fatigue* (RCF) yang terjadi pada lintasan dengan lengkung yang memiliki radius kurang dari 200 m. Sebagai data keausan diambil dengan kurun waktu 4 (empat) bulan yaitu pada Maret-Juni 2023. Kemudian dominan menjelaskan terkait pengaruh kerusakan atau cacat yang terjadi pada bagian permukaan rel.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini sifatnya deskriptif kuantitatif dan difokuskan untuk mengetahui pengaruh permukaan rel lengkung yang memiliki radius maksimum 200 m terhadap *Rolling Contact Fatigue* (RCF). Penelitian ini dilakukan pada lintas operasi MRT Jakarta. Lokasinya terdapat di jalur *Up Track* KM 2+492 – 2+701 yang memiliki radius 184.2 m dan *Down Track* KM 2+485 – 2+714 yang memiliki radius 180 m petak antara stasiun Fatmawati-Cipete Raya.

Tahapan dari penelitian ini dimulai dari survei pendahuluan untuk mengenal lingkungan penelitian secara komprehensif. Kemudian memasuki tahap identifikasi permasalahan untuk mengelompokkan masalah hingga menentukan masalah yang akan diteliti, dilanjutkan dengan tahap perumusan masalah untuk menentukan bobot ilmiah dari penelitian sekaligus memberikan arah yang jelas terkait rencana penelitian. Tahap selanjutnya penentuan tujuan agar penelitian lebih detail dengan tahap pengumpulan data primer dan sekunder untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam rangka mencapai tujuan penelitian. Penelitian diakhiri tahap analisis data kerusakan, tepatnya yang terjadi pada permukaan rel lengkung yang memiliki radius maksimum 200 m, yang kemudian dilakukan pembahasan untuk menghasilkan kesimpulan. Secara lengkap prosedur penelitian sebagaimana Gambar 1.



Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2023)

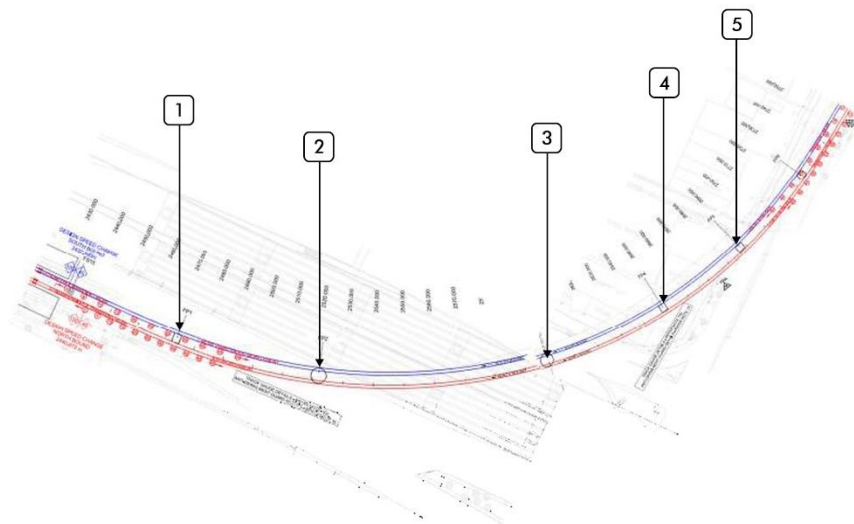
Gambar 1 Prosedur Pengumpulan Data dan Analisis Data

Setelah dilakukan pengumpulan data primer dan sekunder serta menganalisis data yang diperoleh, tahap selanjutnya adalah menentukan titik pada posisi lengkung peralihan hingga lengkung penuh. Dimana titik ini digunakan sebagai data untuk pemantauan dan penghitungan tingkat keausan (Gambar 2). Terdapat 5 (lima) titik lokasi yang telah ditentukan sebagai data pemantauan dan penghitungan tingkat keausan sesuai Tabel 1.

Tabel 1 Titik Lokasi

NOMOR TITIK	NAMA TITIK
TITIK 1	MULAI BUSUR ALIH (MBA)
TITIK 2	MULAI BUSUR (MB)
TITIK 3	INTERSECTION POINT (IP)
TITIK 4	AKHIR BUSUR (AB)
TITIK 5	AKHIR BUSUR ALIH (ABA)

Sumber: Hasil Analisa Penelitian (2023)



Sumber: Kurniawan (2020)
Gambar 2 Lokasi Pengambilan Data Keausan

C. Hasil dan Pembahasan

Variable independent ditentukan berdasarkan *passing tonnage* kereta yang melintas di area lengkung dengan rincian data sesuai Tabel 2. Kemudian data keausan diperoleh dengan cara pengukuran langsung pada titik patok lengkung (Gambar 2) dengan alat bantu *Rail Profile Measurement*. Data keausan akan menjadi *variable dependent* yang akan menjadi dasar perhitungan *forecasting* untuk pemeliharaan rel di lengkung yang ditinjau. Hasil pengukuran keausan *up track* periode Maret-Juni 2023 sesuai Tabel 3.

Tabel 2 Data *Tonnage* Periode Maret-Juni 2023

PASSING TONNAGE	
BULAN	TONNAGE
MARET	1,542,263
APRIL	1, 556,899
MEI	1,559,346
JUNI	1,563,054

Sumber: MRT Jakarta (2023)

Tabel 3 Hasil Pengukuran Keausan *Up Track* Periode Maret–Juni 2023

UP TRACK KM 2+492 – 2+701 (LBB-BHI)				
TITIK PATOK	JUN 2023	MEI 2023	APR 2023	MAR 2023
BTC/MBA	0,27	0,20	0,13	0,06
BCC/MB	1,97	1,71	1,45	1,19
IP	2,33	2,20	2,07	1,94
ECC/AB	2,33	1,85	1,77	1,49
ETC/ABA	0,31	0,23	0,15	0,07
RATA-RATA	1,44	1,24	1,11	0,95

Sumber: MRT Jakarta (2023)

Sesuai analisis pada penelitian ini, data yang digunakan untuk menentukan fungsi regresi linier adalah nilai rata-rata keausan sebagai *variable dependent* yang diambil pada setiap titik patok diarea lengkung. Kemudian *passing tonnage* sebagai *variable independent* yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahannya atau timbulnya *variable dependent*. Hasil perhitungan prediksi keausan lengkung *up track* sebagaimana Tabel 4.

Tabel 4 Perhitungan Prediksi Keausan Lengkung *Up Track*

REGRESI LINEAR UP TRACK KM 2+492 – 2+701 (LBB-BHI)					
BULAN	DATA (X)	DATA (Y)	X ²	Y ²	XY
MARET	1	0,95	1	0,9025	0,95
APRIL	2	1,11	4	1,2321	2,22
MEI	3	1,24	9	1,5376	3,72
JUNI	4	1,44	16	2,0736	5,76
JUMLAH	10	4,74	30	5,7458	12,65
RATA-RATA	2,5	1,19			

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2023)

Sesuai perhitungan prediksi pada Tabel 4 tersebut diatas, maka dilakukan perhitungan menggunakan regresi linear sederhana berikut dengan mencari nilai:

Perhitungan untuk mencari nilai *a* :

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n\sum X^2 - (\sum X)^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$a = \frac{(4,74)(30) - (10)(12,65)}{4(30) - (10)^2} = 0,785$$

Keterangan: *a* adalah konstanta, *n* adalah jumlah data, *Y* adalah *variable dependent*, dan *X* adalah *variable independent*.

Perhitungan untuk mencari nilai *b*:

$$b = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n\sum X - (\sum X)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$b = \frac{4(12,65) - (10)(4,74)}{4(30) - (10)^2} = 0,16$$

Keterangan: *b* adalah koefisien regresi, *n* adalah jumlah data, *Y* adalah *variable dependent*, dan *X* adalah *variable independent*.

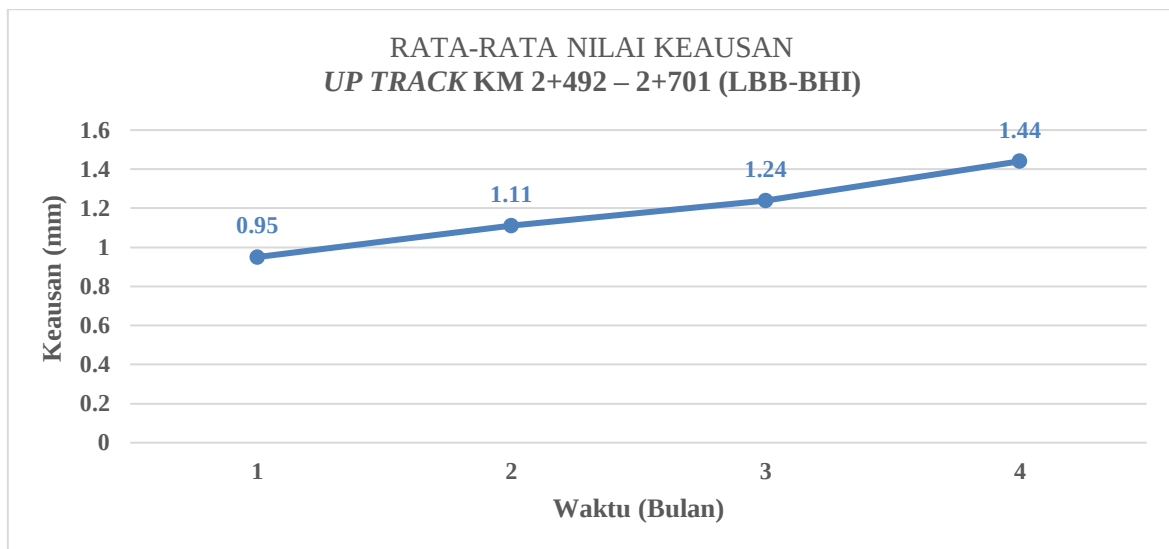
Sehingga didapat persamaan:

$$y = a + bx = 0,785 + 0,16 x$$

Hasil persamaan tersebut dapat digunakan untuk mencari nilai keausan rel sebelah luar jalur *up track* bulan berikutnya, tepatnya pada Juli 2023 dengan nilai perhitungan adalah sebagai berikut:

$$y = 0,785 + 0,16 (5) = 1,585 \text{ mm}$$

Sesuai perhitungan yang telah dibuat tersebut, berdasarkan data yang sudah di rata-rata pada 4 (empat) bulan sebelumnya, dapat diketahui nilai keausan pada bulan akan 5 (lima) tepatnya Juli 2023, yang akan mengalami peningkatan keausan sebesar 1,585 mm. Dimana hasil persamaan tersebut juga dapat digunakan untuk memprediksi keausan pada rel sebelah luar jalur *up track* di bulan berikutnya dengan cara mengganti nilai x dengan bulan berikutnya (Gambar 3).



Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2023)

Gambar 3 Grafik Rata-Rata Keausan Jalur *Up Track*

Berikutnya juga terdapat perhitungan yang dilakukan untuk memprediksi keausan pada rel *down track* bagian luar (Table 5), dengan sistematis yang serupa dengan rel *up track* sebelumnya yaitu dengan menggunakan metode *forecasting* dan analisis regresi linear.

Tabel 5 Hasil Pengukuran Keausan *Down Track* Periode Maret 2023 – Juni 2023

DOWN TRACK KM 2+485 – 2+714 (BHI-LBB)				
TITIK PATOK	JUN 2023	MEI 2023	APR 2023	MAR 2023
BTC/MBA	0,42	0,37	0,32	0,27
BCC/MB	3,01	2,69	2,37	2,05
IP	2,97	2,55	2,13	1,71
ECC/AB	2,33	2,05	1,77	1,49
ETC/ABA	0,38	0,31	0,24	0,17
RATA RATA	1,82	1,59	1,37	1,14

Sumber: MRT Jakarta (2023)

Setelah data hasil pengukuran didapat, semua data setiap bulannya akan dirata-rata dengan hasil data yang didapat pada setiap titik pengukuran dengan hasil tersebut akan dilanjutkan untuk menghitung analisis regresi linear seperti dibawah ini (Tabel 6).

Tabel 6 Perhitungan Prediksi Keausan Lengkung *Down Track*

REGRESI LINEAR DOWN TRACK KM 2+485 – 2+714 (BHI-LBB)					
BULAN	DATA (X)	DATA (Y)	X ²	Y ²	XY
MARET	1	1,14	1	1,2996	1,14
APRIL	2	1,37	4	1,8769	2,74
MEI	3	1,59	9	2,5281	4,77
JUNI	4	1,82	16	3,3124	7,28
JUMLAH	10	5,92	30	9,017	15,93
RATA-RATA	2,5	1,48			

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2023)

Sesuai tabel prediksi keausan pada lengkung *down track* diatas, maka selanjutnya dapat dilakukan perhitungan menggunakan regresi linear sederhana dengan mencari nilai *a* yang merupakan konstanta dan *b* yang merupakan koefisien regresi:

Perhitungan untuk mencari nilai *a* :

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n\sum X^2 - (\sum X)^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$a = \frac{(5,92)(30) - (10)(15,93)}{4(30) - (10)^2} = 0,915$$

Keterangan: *a* adalah konstanta, *n* adalah jumlah data, *Y* adalah variabel dependen, dan *X* adalah variabel independen.

Perhitungan untuk mencari nilai *b* :

$$b = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n\sum X - (\sum X)^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$b = \frac{4(15,93) - (10)(5,92)}{4(30) - (10)^2} = 0,226$$

Keterangan: *b* adalah koefisien regresi, *n* adalah jumlah data, *Y* adalah variabel dependen, dan *X* adalah variabel independen

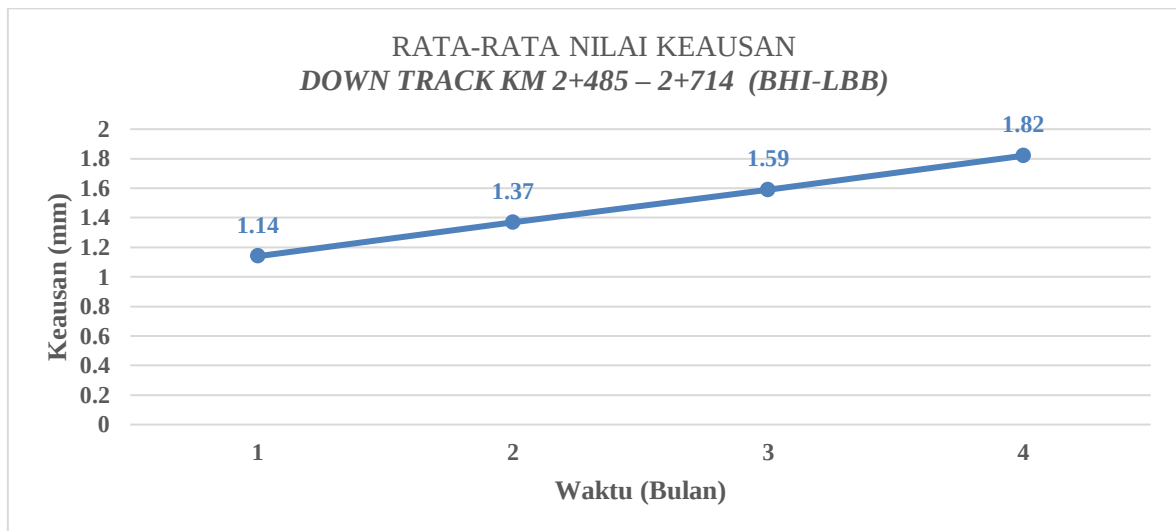
Sehingga didapat persamaan :

$$y = a + bx = 0,915 + 0,226 x$$

Hasil persamaan tersebut dapat digunakan untuk mencari nilai keausan rel sebelah luar jalur *down track* bulan berikutnya tepatnya pada Juli 2023 dengan nilai perhitungan adalah sebagai berikut:

$$y = 0,915 + 0,226 (5) = 2,045 \text{ mm}$$

Sesuai perhitungan yang telah dibuat tersebut berdasarkan data yang sudah di rata-rata pada 4 (empat) bulan sebelumnya, dapat diketahui nilai keausan pada bulan akan 5 (lima) tepatnya Juli 2023 akan mengalami peningkatan keausan sebesar 1,585 mm (Gambar 4). Dimana hasil persamaan tersebut juga dapat digunakan untuk memprediksi keausan pada rel sebelah luar jalur *down track* di bulan berikutnya dengan cara mengganti nilai x dengan bulan berikutnya.



Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2023)
Gambar 4 Grafik Rata-Rata Keausan Jalur *Up Track*

Selanjutnya dari hasil *forecasting* dapat dilanjutkan dengan menentukan nilai akurasi tingkat kesalahan meramal (*forecast error*) dengan menggunakan metode *Mean Absolute Deviation* (MAD), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dan *Mean Squared Error* (MSE) sebagaimana Tabel 7.

Tabel 7 Perhitungan Akurasi Lengkung *Up Track*

BULAN	DATA (X)	DATA (Y)	Y1	MAD	MSE	MAPE
MARET	1	0,95	0,945	0,005	0,000025	0,005263158
APRIL	2	1,11	1,105	0,005	0,000025	0,004504505
MEI	3	1,24	1,265	0,025	0,000625	0,020161290
JUNI	4	1,44	1,425	0,015	0,000225	0,010416667
JULI	5	?	1,585			
RATA-RATA				0,0125	0,000225	0,010086405
				1,25%	0,023%	1,01%

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2023)

Hasil perhitungan untuk masing-masing metode pengukuran akurasi *forecasting* lengkung *up track* adalah sebagai berikut :

$$\text{MAD (Mean Absolute Deviation)} = 1,25\%$$

$$\text{MSE (Mean Squared Error)} = 0,023\%$$

$$\text{MAPE (Mean Absolute Percentage Error)} = 1,01\%$$

Tabel 8 Perhitungan Akurasi Lengkung *Down Track*

BULAN	DATA (X)	DATA (Y)	Y1	MAD	MSE	MAPE
MARET	1	1,14	1,141	0,001	0,0000010	0,000877193
APRIL	2	1,37	1,367	0,003	0,0000090	0,002189781
MEI	3	1,59	1,593	0,003	0,0000090	0,001886792
JUNI	4	1,82	1,819	0,001	0,0000010	0,000549451
JULI	5	?	2,045			
RATA-RATA				0,002	0,0000050	0,001375804
				0,20%	0,0005%	0,154%

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2023)

Hasil perhitungan untuk masing-masing metode pengukuran akurasi *forecasting* lengkung *down track* (Tabel 8) adalah sebagai berikut :

$$\text{MAD (Mean Absolute Deviation)} = 0,20\%$$

$$\text{MSE (Mean Squared Error)} = 0,0005\%$$

$$\text{MAPE (Mean Absolute Percentage Error)} = 0,154\%$$

Tabel 9 Interpretasi hasil MAPE untuk Akurasi Peramalan.

MAPE VALUE	ACCURACY OF FORECAST
LESS THAN 10%	HIGHLY ACCURATE FORECAST
11% TO 20%	GOOD FORECAST
21% TO 50%	REASONABLE FORECAST
MORE THAN 51%	INNACURATE FORCAST

Sumber: Lewis, C.D (1982)

Berdasarkan Tabel 9 menunjukkan hasil yang memuaskan dengan didapat nilai *error* dari perhitungan akurasi peramalan untuk lengkung *down track* dan *up track* masing-masing metode berada dalam range sangat baik yaitu $< 10\%$.

Sesuai hasil diatas dapat ditarik kesimpulan, bahwa hasil perhitungan dari kedua lengkung memiliki nilai *error* akurasi yang relatif kecil. Sehingga data yang digunakan memiliki akurasi peramalan sangat baik dan akurat untuk metode *forecasting* yang digunakan dalam penelitian ini dengan hasil perhitungan *forecasting* pada Tabel 10.

Tabel 10 Hasil Perhitungan Analisis *Forecasting*

DOWN TR. KM 2+485 – 2+714 (BHI-LBB)			UP TR. KM 2+492 – 2+701 (LBB-BHI)		
TAHUN	BULAN	WEAR	TAHUN	BULAN	WEAR
2023	MARET	1,14	2023	MARET	0,95
	APRIL	1,37		APRIL	1,11
	MEI	1,59		MEI	1,24
	JUNI	1,82		JUNI	1,44
	JULI	2,05		JULI	1,65
	AGUSTUS	2,28		AGUSTUS	1,80
	SEPTEMBER	2,50		SEPTEMBER	1,97
	OKTOBER	2,73		OKTOBER	2,14
	NOVEMBER	2,96		NOVEMBER	2,32
	DESEMBER	3,18		DESEMBER	2,49

Sumber: Hasil Analisis Penelitian (2023)

Berdasarkan GK20 atau Gapeka Khusus Operasi, MRT Jakarta setiap hari tersedia 252 perjalanan pulang pergi dengan jenis kereta yang sama dan pada waktu tertentu akan selalu melintasi lokasi lengkung yang diteliti. Sehingga dengan data yang telah kumpulkan selama 4 (empat) bulan, keausan yang diprediksi hingga akhir tahun 2023 adalah 3,18 mm untuk *down track* dan 2,49 mm untuk *up track*.

D. Kesimpulan

MRT Jakarta memiliki lengkung yang *special* dengan spesifikasi di bawah persyaratan yang telah ditentukan akan menimbulkan beragam fenomena yang tidak dapat ditemukan pada lengkung lain. Selain itu, intensitas lalu lintas kereta yang sudah terjadwal berdasarkan GK20 dengan 252 perjalanan pulang pergi dan jenis kereta yang sama. Hasil pantauan dari data yang telah disajikan dianalisa menggunakan metode regresi dari kedua lengkung, persamaan yang dihasilkan dapat memprediksi nilai keausan di bulan-bulan mendatang sehingga jika digunakan untuk jangka waktu panjang dapat memprediksi berapa lama rel dapat melayani dengan mempertimbangkan nilai maksimum keausan yang diizinkan berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api.

Bahwa pada *down track* setiap bulannya rata-rata terjadi keausan sekitar 0,22 mm dan pada *up track* terjadi keausan rata-rata sebesar 0,19 mm. Sesuai data yang telah didapat selama 4 (empat) hingga akhir tahun 2023 prediksi keausan total akan mencapai 3,18 mm untuk *down track* dan 2,49 mm untuk *up track*. Jika mengacu berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, bahwa keausan rel tidak boleh melebihi 15 mm, untuk mencapai angka tersebut dengan data yang tersedia sekarang usia rel di lengkung *up track* diprediksi dapat digunakan yaitu hingga Desember 2029 sedangkan pada *down track* yaitu hingga bulan April 2028.

E. Daftar Pustaka

- Aquib Anis, M., Srivastava, J. P., Duhan, N. R., & Sarkar, P. K. (2018). Rolling contact fatigue and wear in rail steels: An overview. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012098>
- Charoenwong, C., Connolly, D. P., Woodward, P. K., Galvín, P., & Alves Costa, P. (2022). Analytical forecasting of long-term railway track settlement. *Computers and Geotechnics*, 143, 104601. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104601>
- Dong, B., Chen, G., Song, Q., Feng, X., Zhang, J., & Mei, G. (2023). Study on long-term tracking of rail corrugation and the influence of parameters. *Wear*. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204768>
- Ishida, M. (2018). History of Mitigating Rolling Contact Fatigue and Corrugation of Railway Rails in Japan - Review. *EPI International Journal of Engineering*, 1(2), 13–24. <https://doi.org/10.25042/epi-ije.082018.02>
- Kabo, E., Ekberg, A., & Maglio, M. (2019). Rolling contact fatigue assessment of repair rail welds. *Wear*, 436–437, 203030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203030>
- Kurhan, M., Kurhan, D., Novik, R., Baydak, S., & Hmelevska, N. (2020). Improvement of the railway track efficiency by minimizing the rail wear in curves. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012001>
- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods: A Practical Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting*. London ; Boston : Butterworth Scientific.
- Mahmoodian, M., Seyfallahi Asl, A., & Li, C. Q. (2020). Combined effect of rolling contact fatigue and corrosion on structural performance of rails. *Australian Journal of Structural Engineering*, 21(4), 320–328. <https://doi.org/10.1080/13287982.2020.1840012>
- Salas Vicente, F., & Pascual Guillamón, M. (2019). Use of the fatigue index to study rolling contact wear. *Wear*, 436–437(August), 203036. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203036>

203036

- Wu, Y., Lun Pun, C., Huang, P., Welsby, D., Mutton, P., Paradowska, A., & Yan, W. (2023). Effect of creepages on stress intensity factors of rolling contact fatigue cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, 289, 109477. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109477>
- Zhang, H., Ding, H. H., Cui, X. L., Wang, Y., Han, Z. Y., Meli, E., & Wang, W. J. (2023). Experimental investigation on the effect of contact forces on uneven longitudinal wear of rail material. *Wear*, 532–533, 205108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205108>
- Zhang, S. Y., Ding, H. H., Lin, Q., Liu, Q. Y., Spiryagin, M., Wu, Q., Wang, W. J., & Zhou, Z. R. (2023). Experimental study on wheel-rail rolling contact fatigue damage starting from surface defects under various operational conditions. *Tribology International*, 181, 108324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108324>
- Zhang, S. Y., Liu, Q. Y., Ding, H. H., Spiryagin, M., Wu, Q., Guo, L. C., & Wang, W. J. (2023). Predicting crack initiation for rolling contact on rail having a surface indentation. *Wear*, 530–531, 205041. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205041>
- Zhou, X., Li, S., Wang, J., Wang, K., & Jing, L. (2023). Fatigue crack growth in wheel-rail rolling-sliding contact: A perspective of elastic-plastic fracture mechanics criterion. *Wear*, 530–531, 205069. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205069>
- Zhu, J., Withers, P. J., Wu, J., Liu, F., Yi, Q., Wang, Z., & Tian, G. Y. (2021). Characterization of Rolling Contact Fatigue Cracks in Rails by Eddy Current Pulsed Thermography. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2307–2315. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003335>