

Pengembangan Model untuk Memprediksi *Ballast Settlement* pada Kondisi Beban Gandar dan Kecepatan Kereta Api yang Berbeda

M.D. Prawira^{1*}, S.H.T. Utomo¹, T. Rahman¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: muhammaddanuprawira@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Jalur kereta api dapat mengalami deformasi plastis (atau *settlement*) akibat dari beban dinamis kereta api. *Settlement* ini dapat berdampak buruk terhadap geometri jalur bila melebihi ambang batas yang dipersyaratkan. *Ballast settlement* dianggap memberikan kontribusi paling besar dibanding lapisan struktur lainnya terhadap keseluruhan *settlement*. Besaran beban gandar dan kecepatan kereta api memiliki peranan penting terhadap *ballast settlement*. Untuk mengetahui perubahan geometri jalur kereta api, diperlukan pemahaman terhadap *settlement* yang muncul akibat faktor-faktor tersebut, salah satunya memprediksi tingkat *settlement* yang dapat terjadi. Oleh karena itu, makalah ini bertujuan untuk mengembangkan model empiris untuk memprediksi *ballast settlement* pada beban gandar dan kecepatan kereta api yang berbeda. Pengembangan model didasarkan pada data pengujian laboratorium yang telah dilakukan terdahulu. Formulasi model dilakukan dengan menganalisis *best-fit curve* dan *best-fit equation* pola pertumbuhan *settlement ballast*. Rumus logaritmik dipilih sebagai *best-fit equation* karena mampu memberikan hasil pengukuran yang paling mendekati dengan pola *ballast settlement* pada hasil pengujian laboratorium. Berdasarkan hasil validasi model, rumus logaritmik tersebut termasuk dalam kategori “Baik” untuk memprediksi *settlement ballast* berdasarkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).

Kata kunci: *ballast settlement*, beban gandar, kecepatan, model empiris

1 PENDAHULUAN

Peningkatan beban tonase dan kecepatan kereta api semakin menuntut meningkatnya kehandalan jalur kereta api. Menurut Li dkk. (2016), salah satu faktor kehandalan jalur kereta api adalah kekuatan struktur jalur kereta api untuk menahan beban operasional. Jalur kereta api dapat mengalami deformasi tetap (atau *settlement*) akibat dari beban dinamis yang berulang. Menurut Dahlberg (2004), *settlement* terjadi ketika struktur jalur tidak kembali ke posisi awal sesaat setelah menerima beban dinamis, melainkan kembali ke posisi mendekati posisi semula. *Settlement* dapat berdampak buruk terhadap geometri jalur kereta api apabila melebihi ambang batas yang dipersyaratkan. *Settlement* pada setiap lapisan struktur jalur kereta api dapat berbeda-beda. *Ballast settlement* berkontribusi paling besar dibanding lapisan lainnya terhadap keseluruhan *settlement* (Tutumluer dkk., 2013). *Ballast settlement* umumnya disebabkan oleh kerusakan partikel *ballast*. Gesekan antar partikel *ballast* dapat menyebabkan kerusakan *ballast* sehingga mengurangi kekuatan stabilitas *ballast*. Selain faktor partikel, besaran beban gandar dan kecepatan kereta api juga berperan terhadap *ballast settlement* (Guo dkk., 2020). Pendapat ini diperkuat oleh penelitian yang dilakukan oleh Abadi dkk. (2016) bahwa tingkat *ballast settlement* memiliki nilai yang berbeda bila beban gandar dan kecepatan kereta api yang melintas berbeda.

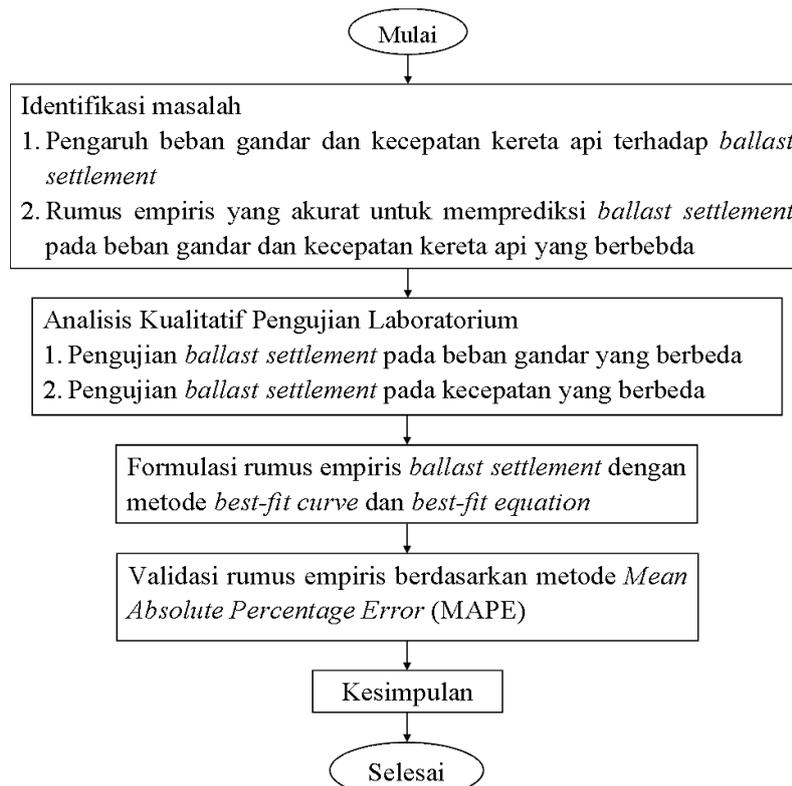
Untuk mengetahui perubahan geometri jalur, diperlukan pemahaman terhadap fenomena *settlement* yang muncul akibat faktor-faktor tersebut. Beberapa model empiris telah dikembangkan dalam beberapa waktu terakhir untuk memprediksi *ballast settlement*. Model empiris yang paling umum digunakan di sektor perkeretaapian dikembangkan oleh Selig dan Waters (1994). Model tersebut memperhitungkan *ballast settlement* dengan variabel tegangan *ballast* dan jumlah siklus beban. Kemudian Sato (1995) mengembangkan model empiris dengan mempertimbangkan variabel jumlah siklus beban. Saussine dkk. (2014) mengembangkan model dengan menilai intensitas getaran dan karakteristik waktu. Model *ballast settlement* terbaru dikembangkan oleh Charoenwong dkk. (2022) yang memperhitungkan variabel perubahan iregularitas jalur dan tekanan deviatorik. Namun, diantara model-model tersebut belum terdapat model empiris yang memperhitungkan variabel beban gandar dan kecepatan kereta api secara bersamaan karena kedua variabel tersebut memiliki peranan yang signifikan terhadap *ballast settlement*. Selain itu, kedua variabel tersebut mudah dikenali pada praktikal di lapangan sehingga memudahkan untuk memprediksi *ballast settlement*. Berdasarkan latar belakang tersebut, makalah ini bertujuan untuk mengembangkan model empiris untuk memprediksi *ballast settlement* pada kondisi beban gandar dan kecepatan kereta api yang berbeda.

2 METODOLOGI

Prosedur penelitian ini dijabarkan pada Gambar 1, dimana tahap awal pengembangan model empiris *ballast settlement* dilakukan dengan melakukan analisis kualitatif terhadap beberapa pengujian laboratorium *ballast settlement*. Pengujian *ballast settlement* tersebut dilakukan dengan menerapkan tingkatan beban gandar dan kecepatan kereta api yang berbeda. Pendekatan kualitatif dilakukan untuk menganalisa seberapa besar tingkat *ballast settlement* pada variasi beban gandar dan kecepatan kereta api. Selain itu, metode ini juga bertujuan untuk mengetahui faktor yang berpengaruh terhadap *ballast settlement* saat meningkatnya beban gandar dan kecepatan.

Berdasarkan data pengujian laboratorium *ballast settlement* tersebut, tahap selanjutnya adalah melakukan formulasi model empiris untuk memprediksi *ballast settlement*. Tahap ini diawali dengan menganalisa *best-fit curve* dan *best-fit equation* pola *ballast settlement*. Metode ini dilakukan untuk mendapatkan tipe rumus empiris dan pola lengkung grafik yang sesuai atau paling mendekati pola *ballast settlement* pada hasil pengujian laboratorium. Dengan mendapatkan *best-fit curve* dan *best-fit equation*, diharapkan model rumus baru nantinya dapat mengukur *ballast settlement* dengan tingkat akurasi yang baik sehingga bisa menggambarkan kondisi *ballast settlement* pada kondisi aktual.

Tahap terakhir adalah melakukan validasi model untuk menilai tingkat akurasi hasil pengukuran dengan hasil pengujian *ballast settlement*. Validasi model dilakukan dengan metode *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Menurut Makridakis dkk. (1998), MAPE merupakan metode yang paling umum dan reliabel dalam menilai tingkat akurasi suatu model prediksi. Menurut Lewis (1982), nilai MAPE dibagi menjadi empat kategori dimana kurang dari 10% adalah “Baik Sekali”, 10-20% adalah “Baik”, 20-50% adalah “Dapat Diterima” dan lebih dari 50% adalah “Tidak Akurat”.



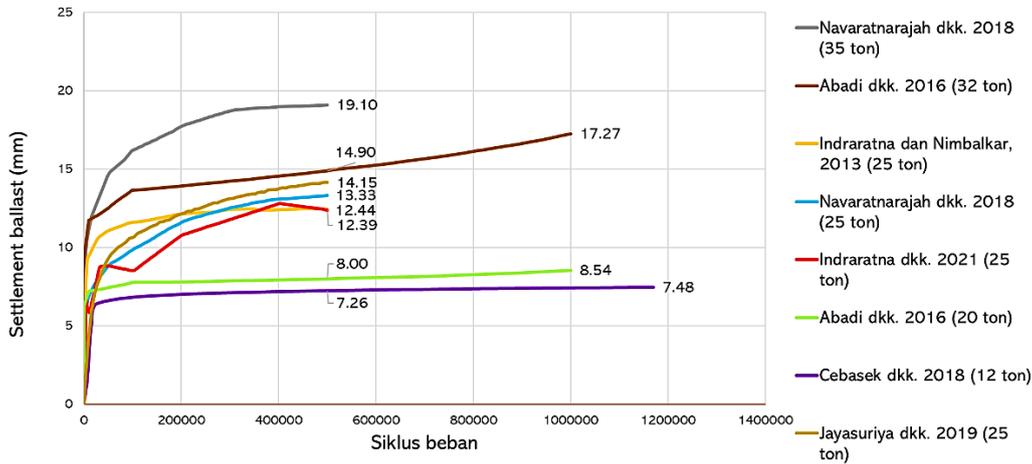
Gambar 1. Diagram alur penelitian.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian *ballast settlement* pada beban gandar kereta api yang berbeda

Analisis *ballast settlement* dengan variasi beban gandar dilakukan terhadap delapan pengujian laboratorium. Gambar 2 menunjukkan tingkat *ballast settlement* pada kondisi beban gandar yang berbeda-beda. Pengujian laboratorium dengan beban gandar 12 ton, *ballast settlement* mencapai 7,48 mm pada 1.170.000 siklus beban. Peningkatan beban gandar menjadi 20 ton, *ballast settlement* meningkat menjadi 8,54 mm pada siklus beban ke 1.000.000. Hasil ini

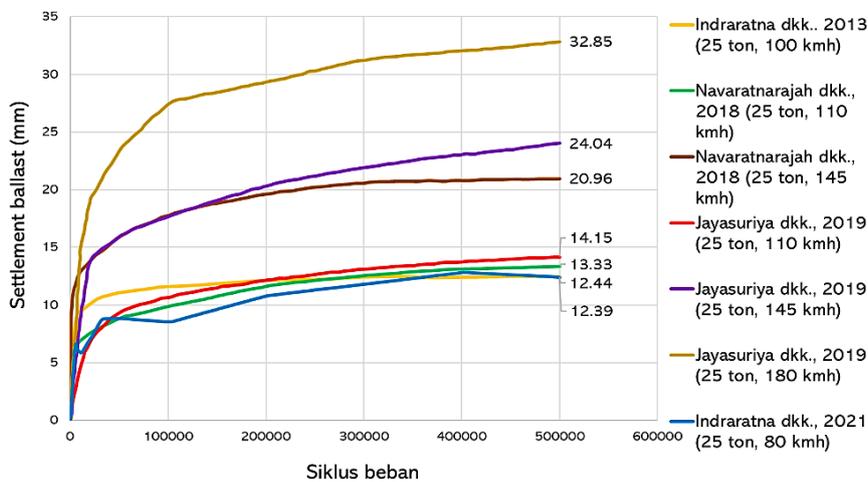
menunjukkan peningkatan *ballast settlement* sekitar 14%. Selanjutnya, pengujian *ballast settlement* dengan beban gandar 25 ton dilakukan pada empat pengujian laboratorium yang berbeda. Keempat pengujian tersebut menghasilkan tingkat *ballast settlement* yang saling mendekati pada 500.000 siklus beban yakni berkisar antara 12,39-14,15 mm. Nilai ini menunjukkan terjadi peningkatan *ballast settlement* sekitar 55-77% dari hasil pengujian *ballast* pada beban gandar 20 ton. Pada beban gandar 32 ton, terjadi peningkatan *ballast settlement* sekitar 0,75-2,51 mm atau sekitar 5-20% pada 500.000 siklus dari pengujian *ballast* pada beban gandar 25 ton. Pada beban gandar terbesar yaitu 35 ton, terjadi peningkatan sebesar 4,2 mm atau sebesar 28%. Hasil seluruh pengujian *ballast settlement* ini menunjukkan bahwa semakin besar beban gandar maka akan memperbesar *ballast settlement* pada jumlah siklus beban yang sama.



Gambar 2. *Ballast settlement* pada beban gandar kereta api yang berbeda.

3.2 Pengujian *ballast settlement* pada kecepatan yang berbeda

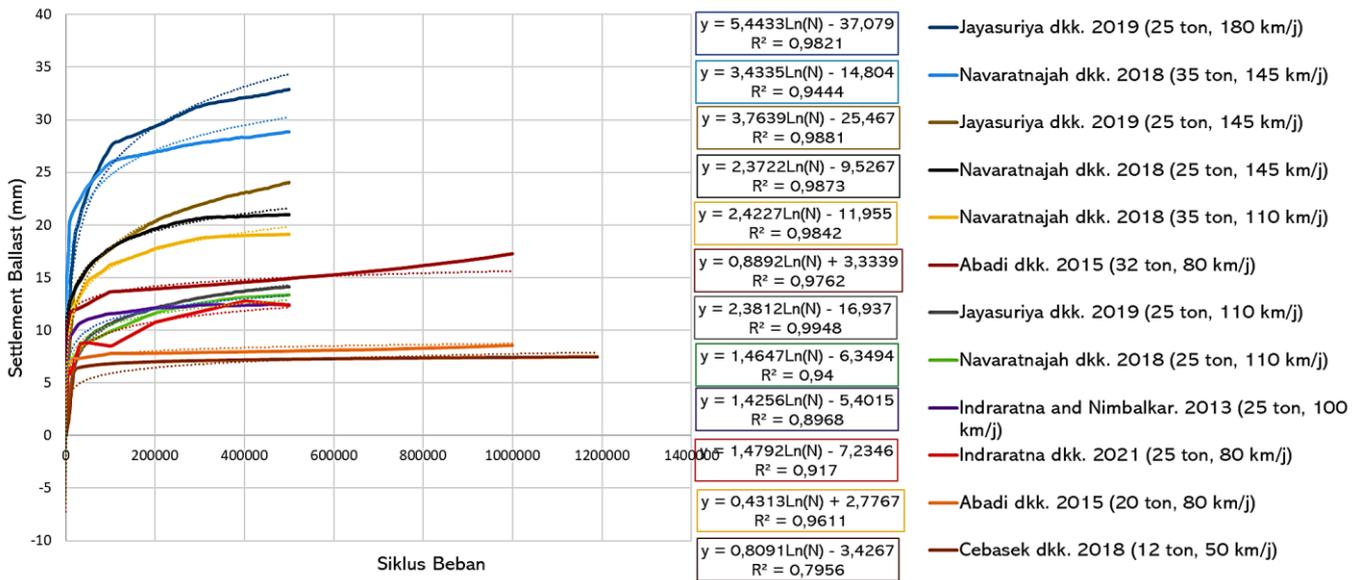
Analisis pengujian *ballast settlement* pada tingkat kecepatan yang berbeda dilakukan terhadap tujuh pengujian laboratorium seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Simulasi kecepatan yang digunakan berkisar antara 80-180 km/j. Pada tingkat kecepatan 80 km/j, *ballast settlement* mencapai 12,39 mm pada 500,000 siklus beban. Terjadi sedikit peningkatan *ballast settlement* ketika kecepatan kereta meningkat menjadi 100 km/j, dimana *ballast settlement* mencapai 12,44 mm atau bertambah sekitar 0,4%. Kemudian, saat kecepatan meningkat menjadi 110 km/j *ballast settlement* meningkat sekitar 0,89-1,71 mm atau sekitar 7-13%. Peningkatan *ballast settlement* terjadi secara signifikan saat kecepatan kereta api meningkat menjadi 145 km/j, dimana *ballast settlement* meningkat sebesar 57-70%. Kemudian, saat kecepatan dinaikan menjadi 180 km/j, *ballast settlement* semakin bertambah menjadi 32,85 mm atau meningkat sebesar 37-57%. Data-data pengujian *ballast settlement* yang disajikan menunjukkan bahwa kecepatan kereta api mempengaruhi tingkat *ballast settlement* yang dihasilkan. Semakin cepat kereta api yang melintas maka tingkat *ballast settlement* akan semakin tinggi.



Gambar 3. *Ballast settlement* pada kecepatan kereta api yang berbeda.

3.3 Formulasi rumus empiris *ballast settlement*

Formulasi rumus empiris dilakukan untuk mencari model rumus yang akurat untuk memprediksi *ballast settlement* pada kondisi beban gandar dan kecepatan yang berbeda. *Best-fit curve* dan *best-fit equation* dari setiap pola *ballast settlement* pada beban gandar dan kecepatan yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan analisis *best-fit curve*, *trendline* dan rumus logaritmik adalah yang paling sesuai untuk menggambarkan pola pertumbuhan *ballast settlement* pada kondisi beban gandar dan kecepatan yang berbeda. Tipe rumus logaritmik ini dijadikan sebagai rumus dasar untuk memformulasikan model empiris *ballast settlement* yang baru karena dapat memberikan pola *ballast settlement* yang non-linier. Karena pada grafik *ballast settlement* hanya terdapat variabel jumlah siklus beban dan tingkat *ballast settlement*, maka formulasi variabel beban gandar dan kecepatan ke dalam model baru dilakukan dengan melakukan simplifikasi nilai koefisien dari setiap rumus logaritmik.



Gambar 4. *Best-fit curve* dan *best-fit equation ballast settlement* pada beban gandar dan kecepatan yang berbeda.

Menurut Li dkk. (2016), variabel beban gandar dan kecepatan berpengaruh terhadap nilai beban dinamis kereta api. Oleh karena itu, variabel beban gandar dan kecepatan kereta api dihitung terlebih dahulu ke dalam rumus beban dinamis yang diperkenalkan oleh *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association/AREMA* (2012) pada Persamaan (1).

$$P_d = \left(1 + \frac{0,0052V}{D} \right) P_s \tag{1}$$

Dimana P_d adalah beban roda dinamis (kN), V adalah kecepatan kereta (km/j), D adalah diameter roda kereta (m), dan P_s adalah beban roda statis (kN). Pengaruh beban gandar dan kecepatan terhadap *ballast settlement* dinilai berdasarkan besarnya beban dinamis yang dihasilkan sehingga rumus baru *ballast settlement* akan memasukan variabel beban dinamis kereta api. Simplifikasi rumus logaritmik dengan variabel beban dinamis didapatkan seperti pada Persamaan (2).

$$S_N = 2,2 \times 10^{-5} \times P_d \times \text{Ln}(N) \times h \tag{2}$$

Dimana S_N adalah *ballast settlement* (mm), P_d adalah beban roda dinamis (kN), h adalah tinggi *ballast* (mm), dan N adalah jumlah siklus beban. Fungsi logaritmik normal (Ln) berfungsi pada variabel jumlah siklus beban karena adanya korelasi antara jumlah siklus beban dengan pola non-linier *ballast settlement* yang dihasilkan.

3.4 Validasi model empiris

Validasi model dilakukan dengan menghitung nilai *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) antara perhitungan empiris dengan data pengujian *ballast settlement* seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai MAE dan MAPE *ballast settlement*

Beban gandar (ton)	Kecepatan (km/jam)	Data pengujian <i>ballast settlement</i> (mm) pada siklus $N = 500.000$	Perhitungan empiris <i>ballast settlement</i> (mm) pada siklus $N = 500.000$	Rata-rata nilai MAE (mm) pada siklus $N = 1$ s.d 500.000	Rata-rata nilai MAPE (%) pada siklus $N = 1$ s.d 500.000
25	100	12,44	16,81	3,50	29,54
20	80	8,00	12,33	1,68	23,48
32	80	14,90	19,72	2,51	20,26
25	110	13,34	16,87	3,63	28,49
25	145	20,96	18,86	2,06	8,66
35	110	19,10	23,61	4,21	22,77
35	145	28,86	26,40	2,14	8,40
25	110	14,15	16,30	2,62	20,38
25	145	24,04	18,00	3,58	16,72
25	180	32,85	19,71	9,54	33,56
12	50	7,26	8,71	1,74	18,05
25	80	12,37	15,16	2,79	23,99
35,75	75	25,66	25,88	2,21	6,98
25	100	16,93	15,50	2,76	11,20
				3,21	19,46

Rata-rata nilai MAE dan MAPE dari hasil pengukuran dengan model empiris yang baru adalah 3,21 mm dan 19,46%. Nilai tersebut merupakan nilai rata-rata dari setiap siklus beban (N) pada rentang siklus 1 s.d 500.000. Berdasarkan pengkategorian nilai MAPE yang dikenalkan oleh Lewis (1982), model tersebut termasuk ke dalam kategori “Baik” untuk memprediksi *ballast settlement*.

3.5 Pembahasan

Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa beban gandar dan kecepatan kereta api mempengaruhi tingkat *ballast settlement*. Kondisi tersebut kemungkinan dapat dipengaruhi oleh meningkatnya beban dinamis dan getaran yang terdistribusi ke struktur jalur kereta api yang dapat memperparah kerusakan partikel *ballast*. Rusaknya partikel *ballast* seperti berkurangnya sudut tajam partikel, mengecilnya ukuran partikel, menghilangnya kekasaran permukaan partikel, dan partikel *ballast* yang pecah dapat meningkatkan tegangan vertikal dan lateral *ballast* sehingga memperbesar *ballast settlement* (Navaratnarajah dkk., 2018).

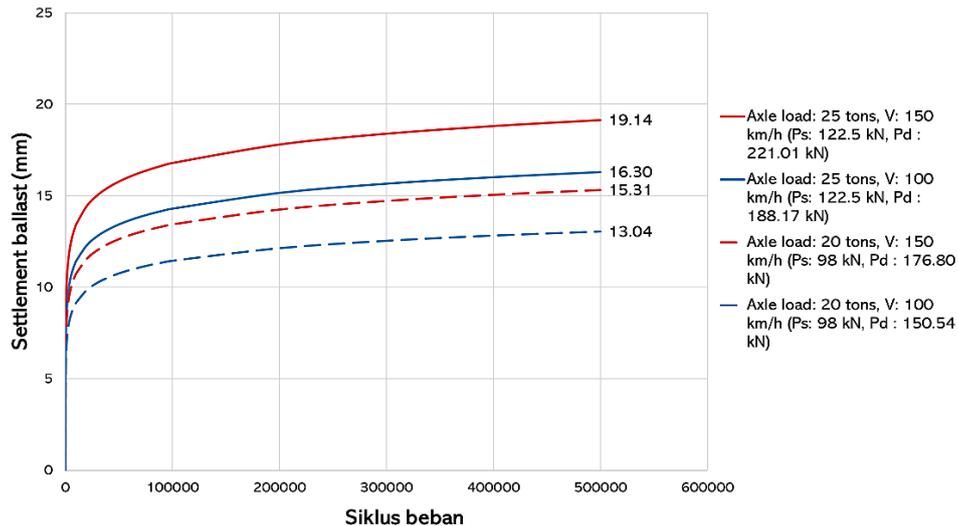
Pola *settlement* pada setiap tingkatan beban gandar dan kecepatan kereta api memiliki pola grafik yang sama ketika siklus beban semakin tinggi. Berdasarkan analisis *best-fit curve* diketahui bahwa pola tersebut terbentuk secara pola non-linier logaritmik. Rumus logaritmik dipilih sebagai basis pengembangan model empiris karena mampu untuk menghasilkan pola non-linier *settlement* yang mendekati hasil pengujian laboratorium. Rumus ini dikombinasikan dengan variabel beban dinamis untuk mendapatkan rumus tunggal. Kombinasi rumus yang dihasilkan memperhitungkan variabel beban dinamis, tinggi *ballast* dan jumlah siklus beban. Implementasi variabel-variabel tersebut pada rumus baru dapat menghasilkan nilai *ballast settlement* yang bervariasi seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Perhitungan *settlement* pada beban gandar 20 ton dengan kecepatan 100 km/j dan 150 km/j nilai *ballast settlement* adalah 13,04 mm dan 15,31 mm pada 500.000 siklus. Sedangkan pada beban gandar 25 ton dengan kecepatan 100 km/j dan 150 km/j, *ballast settlement* mencapai 16,30 mm dan 19,14 mm pada siklus beban yang sama.

Hasil validasi model menunjukkan bahwa model empiris tersebut mampu menghasilkan nilai *ballast settlement* mendekati kondisi aktual. Hal ini ditunjukkan dengan nilai MAPE yang tergolong ke dalam kategori “Baik” berdasarkan tingkatan kategori yang dikenalkan oleh Lewis (1982). Model tersebut tergolong “Baik” karena nilai rata-rata keseluruhan hasil perhitungan empiris *ballast settlement* menghasilkan deviasi yang tidak melebihi 20% dari hasil pengujian *ballast settlement*.

4 KESIMPULAN

Pengembangan model empiris *ballast settlement* didasarkan pada analisis terhadap hasil pengujian laboratorium yang dilakukan pada penelitian-penelitian terdahulu. Pengujian laboratorium tersebut dilakukan pada kondisi beban gandar dan kecepatan kereta api yang berbeda. Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Beban gandar dan kecepatan kereta api berpengaruh terhadap tingkat *ballast settlement*. Hal ini dapat disebabkan oleh meningkatnya beban dinamis dan getaran sehingga meningkatkan kerusakan *ballast* yang berujung pada semakin besarnya *ballast settlement*.
- Rumus logaritmik menjadi rumus dasar yang paling sesuai untuk mengembangkan model empiris karena mampu menghasilkan pola *ballast settlement* yang paling mendekati dengan kondisi aktual *ballast settlement*.
- Model empiris yang dikembangkan termasuk kedalam kategori “Baik” untuk memprediksi *ballast settlement* berdasarkan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Implementasi faktor beban gandar dan kecepatan mempermudah dalam memprediksi *ballast settlement* yang akan terjadi pada praktikal di lapangan.



Gambar 5. Hasil pengukuran settlement *ballast* dengan rumus empiris baru.

REFERENSI

- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. Butterworths., London, England.
- Selig, E.T., and Waters, J.M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford., London, England.
- Sato, Y. (1995). “Japanese Studies on Deterioration of *Ballasted Track*.” *Vehicle System Dynamics*., 24(sup1), 197–208.
- Dahlberg, T. (2001). “Some railroad settlement models-a critical review.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*., 215(4), 289-300.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., and Hyndman, R. J. (2008). *Forecasting methods and applications*. John wiley & sons., Chichester, England.
- AREMA. (2012). *Manual of Railway Engineering*. American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, Lanham, MD.
- Indraratna, B., and Nimbalkar, S. (2013). “Stress-Strain Degradation Response of Railway *Ballast* Stabilized with Geosynthetics.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*., 139(5), 684–700.
- Saussine, G., Quezada, J.C., Breul, P., and Radjai, F. (2014). “Railway *Ballast* Settlement: A New Predictive Model.” *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, Civil Comp Press, Stirlingshire, UK, 121.
- Abadi, T., Le Pen, L., Zervos, A., and Powrie, W. (2016). “A Review and Evaluation of *Ballast* Settlement Models using Results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF)” *In: Procedia Engineering*, 143, 999–1006.
- Li, D., Hyslip, J., Sussman, T., and Chrismer, S. (2016). *Railway Geotechnics*, CRC Press., Boca Raton.
- Čebašek, T.M., Esen, A.F., Woodward, P.K., Laghrouche, O., and Connolly, D.P. (2018). “Full scale laboratory testing of *ballast* and concrete slab tracks under phased cyclic loading.” *Transportation Geotechnics*., 17, 33–40.
- Navaratnarajah, S.K., Indraratna, B., and Ngo, N.T. (2018). “Influence of Under Sleeper Pads on *Ballast* Behavior Under Cyclic Loading: Experimental and Numerical Studies.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*., 144(9).
- Jayasuriya, C., Indraratna, B., and Ngo, T. N. (2019). “Experimental study to examine the role of under sleeper pads for improved performance of *ballast* under cyclic loading.” *Transportation Geotechnics*., 19, 61-73.

Guo, Y., Wang, J., Markine, V., and Jing, G. (2020). “Ballast Mechanical Performance with and without Under Sleeper Pads.” *KSCE Journal of Civil Engineering*., 24(11), 3202–3217.

Indraratna, B., Ngo, T., Ferreira, F.B., Rujikiatkamjorn, C., and Tucho, A. (2021). “Large-scale testing facility for heavy haul track.” *Transportation Geotechnics*., 28.

Charoenwong, C., Connolly, D.P., Woodward, P.K., Galvín, P., and Alves-Costa, P. (2022). “Analytical forecasting of long-term railway track settlement.” *Computers and Geotechnics*, 143.