

# Risiko *Rail Buckling* di Inggris Raya atas Dampak Perubahan Iklim di Masa Mendatang

J. Santoso<sup>1</sup>, L.B. Suparma<sup>1\*</sup>, T. Rahman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

\*Corresponding author: lbsuparma@ugm.ac.id

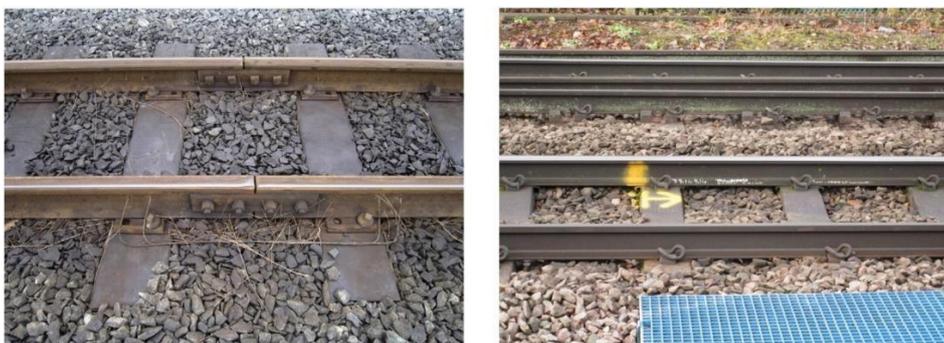
## INTISARI

Makalah ini mengkaji risiko tekukan rel di Inggris Raya yang dipengaruhi oleh dampak perubahan iklim di masa mendatang. Transportasi rel sangat penting untuk pergerakan penumpang dan barang yang efisien; namun, sistem rel tradisional tidak memadai untuk perjalanan berkecepatan tinggi. Continuous Welded Rail (CWR) sebagian besar telah menggantikan sambungan konvensional untuk meningkatkan stabilitas dan kenyamanan berkendara, tetapi menimbulkan risiko yang signifikan karena ekspansi termal tanpa celah ekspansi. Studi ini membahas kondisi yang menyebabkan tekukan rel, yang didefinisikan sebagai tegangan kompresif yang menyebabkan deformasi rel pada suhu tinggi. Insiden masa lalu, seperti anjloknya rel di dekat Langworth, Lincolnshire, menggambarkan konsekuensi parah dari tekukan rel yang diperburuk oleh iklim ekstrem. Temuan tersebut menyoroti perlunya tindakan proaktif dalam konstruksi dan pemeliharaan rel, terutama dalam menghadapi musim panas yang diproyeksikan lebih panas dan lebih kering di Inggris. Memahami risiko ini sangat penting untuk menjaga keselamatan rel dan integritas infrastruktur.

Kata kunci: rail buckling, CWR, perubahan iklim, Inggris.

## 1 PENDAHULUAN

Kereta api telah lama digunakan sebagai moda transportasi yang nyaman dan penting untuk mengangkut penumpang dan barang dari satu lokasi ke lokasi lain. Menjamin kereta api yang dapat melaju dengan kecepatan tinggi dan memberikan kenyamanan yang memadai bagi penumpang merupakan salah satu tantangan utama untuk meningkatkan produktivitas kereta api (Choi dkk., 2019). Sayangnya, rel kereta api tradisional tidak memadai untuk kereta api berkecepatan tinggi karena terdapat celah sambungan pada setiap beberapa meter. Dari Gambar 1 (kiri), dapat dilihat bahwa masing-masing ujung rel dihubungkan menggunakan "*fishplates*", yang merupakan pelat baja datar yang dipasang menggunakan baut pada ujung rel dan meninggalkan celah kecil di antara setiap rel.

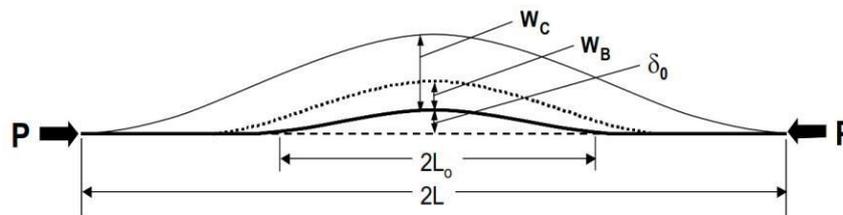


Gambar 1. Rel yang disambung dengan *fishplate* (kiri) dan *Continuous Welded Track* (kanan)  
(Jones & Ashby, 2019)

Gambar 1 (kanan) menggambarkan *Continuous Welded Rail* (CWR), yang dibuat dengan menyambung beberapa rel menjadi satu bagian tunggal untuk menjaga kestabilan saat kecepatan kendaraan meningkat. CWR telah menggantikan sebagian besar rel kereta tradisional di sebagian besar jalur kereta api di seluruh dunia. Dibandingkan dengan rel yang disambung dengan *fishplate*, CWR menawarkan banyak keuntungan seperti: mampu mengakomodasi kereta dengan kecepatan yang lebih tinggi, perjalanan yang lebih nyaman, pengurangan getaran, memperpanjang durasi antara sesi perawatan, dan peningkatan masa pakai kereta dan relnya karena tidak adanya celah antar sambungan rel (Enshaeian & Rizzo, 2021; Khatibi dkk 2020).

Selain manfaatnya, CWR juga memiliki setidaknya satu kekurangan, yaitu menghasilkan bagian rel yang sangat panjang yang dapat menghasilkan tekanan longitudinal termal yang signifikan saat sambungan ekspansi tidak ada. Atapin et al. (2022) menyebutkan bahwa regangan yang disebabkan oleh temperatur dan perubahan rentang temperatur pengoperasian rel dapat disebabkan oleh kesalahan yang terjadi selama pemasangan CWR dan selama perawatan yang dilakukan. Kesalahan yang disebutkan di atas, beserta kondisi yang memungkinkan terjadinya regangan yang disebabkan karena temperatur pada rel, disebabkan oleh pengaruh beban kereta api serta variabel iklim dan lingkungan. Semua faktor ini jika digabungkan dapat mengakibatkan *rail buckling*. Kabo and Ekberg (2024) mendefinisikan *rail buckling* sebagai suatu kondisi di mana tegangan kompresif yang dihasilkan oleh ekspansi termal rel menyebabkan rel tertekuk. Kondisi ini dapat dicegah jika terdapat celah antara dua rel, seperti yang ada pada rel yang disambung dengan *fishplate*. Namun pada CWR, celah sambungan tersebut tidak ada, sehingga tegangan kompresif mulai terbentuk di sepanjang rel.

Kish & Samavedam (2013) menggambarkan mekanisme terjadinya *rail buckling* seperti dapat dilihat pada Gambar 2, dimana CWR yang panjang dan lurus dengan sedikit ketidaksejajaran awal (*initial misalignment*), ditunjukkan oleh panjang gelombang ( $2L_0$ ) dan amplitudo ( $\delta_0$ ). *Initial misalignment* adalah penyimpangan atau ketidaksejajaran awal berbentuk sinusoidal pada rel dari posisi atau jalur idealnya pada saat pemasangan atau setelah digunakan dalam jangka waktu tertentu, sebagai akibat dari gaya tekan ( $P$ ) yang meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur rel. *Initial misalignment* dapat meningkat secara progresif ke  $W_B$ , yang merupakan keadaan tidak stabil. Dalam kondisi ini, rel berpotensi berubah bentuk secara tiba-tiba ke lokasi lateral baru yang dikenal sebagai *rail buckling* ( $W_C$ ) yang panjangnya  $2L$ .



Gambar 2. Mekanisme terjadinya *rail buckling* (Kish & Samavedam, 2013)

Akibat terburuk dari fenomena *rail buckling* adalah tergelincirnya kereta api. Sebagai contoh, di daerah sekitar Langworth, Lincolnshire, Inggris, pada hari Selasa, 30 Juni 2015, sebuah kereta barang yang membawa 22 gerbong tangki kosong tergelincir akibat *rail buckling*, yang mengakibatkan kerusakan signifikan pada prasarana dan sarana kereta api seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan laporan dari (Rail Accident Investigation Branch, 2016), *rail buckling* tersebut terjadi karena tekanan berlebih yang disebabkan oleh rel yang memuai akibat temperatur tinggi, yang melampaui kemampuan balas untuk menahan rel agar tetap pada tempatnya. *Initial misalignment* pada rel dan minimnya punggung balas mengakibatkan berkurangnya ketahanan terhadap terjadinya *buckling*. Kecelakaan tersebut terjadi pada hari terpanas yang terjadi pada tahun 2015.



Gambar 3. Kecelakaan kereta api disebabkan oleh *rail buckling* di sekitar Langworth, Lincolnshire, Inggris (Rail Accident Investigation Branch, 2016)

Lebih lanjut, Met Office (2023) melalui United Kingdom Climate Projections yang terbaru (UKCP18) menekankan bahwa manusia harus bersiap dengan musim panas di masa depan yang lebih panas dan kering dibanding tahun-tahun sebelumnya. Mengingat peringatan tersebut di atas, jelas bahwa kemungkinan terjadinya *rail buckling* karena

temperatur di Inggris akan terus meningkat dalam beberapa tahun mendatang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana dampak perubahan iklim terhadap risiko *rail buckling* di masa mendatang di Inggris Raya, menggunakan metode yang akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

2 METODOLOGI

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Penulis menggunakan kumpulan data dari *the United Kingdom Climate Projections 2018* (UKCP18) untuk membuat proyeksi temperatur udara maksimum harian dari tahun 2025 sampai 2099 di Inggris Raya. Tabel 1 menunjukkan kriteria yang diterapkan pada pengunduhan data dari UKCP18 (Met Office, 2018) dalam proyeksi ini.

Tabel 1. Kriteria untuk proyeksi temperatur udara maksimum

Variable	Maximum air temperature at 1.5m
Area	United Kingdom
Scenario	RCP8.5
Time Period	Daily
Time Range	2025 - 2099

- b) Dengan menggunakan Ms. Excel, temperatur udara maksimum tahunan dapat ditentukan menggunakan data temperatur udara maksimum harian yang diberikan dari UKCP18.
- c) Dari data temperatur udara maksimum tahunan, dapat ditentukan temperatur rel maksimum tahunan menggunakan Persamaan (1) (Dobney dkk., 2009).

$$T_{rail} = \frac{3}{2} T_{air} \tag{1}$$

dimana  $T_{rail}$  adalah temperatur rel dan  $T_{air}$  adalah temperatur udara.

- d) Untuk memprediksi terjadinya *rail buckling* digunakan Track Buckling Predictor ETI0606T-01 dari Australian Rail Track Corporation Limited (2017) yang tampilannya dapat dilihat pada Gambar 4.

**Track Buckling Predictor**

This spreadsheet uses models developed by Bartlett and Schramm to predict the rail temperature at which the track will buckle.

Place inputs in the **YELLOW** cells. Choose data highlighted in **BLUE** from Drop Down lists.  
For detailed instructions, refer to the Procedure Spreadsheet.

<b>Inputs</b>		
1 Rail Weight (Kg)	60 kg	
2 Sleeper Spacing (mm)	660	mm
3 Type of Sleeper and Fastening	EC	
4 Ballast Shoulder Width (mm)	300	Range 0 - 300
5 Length - Initial Misalignment (m)	6	metres
6 Amplitude - Initial Misalignment (mm)	30	mm
7 Rail - Actual Stress Free Temperature (°C)	27	°C
8 Wagon L/V Ratio	0.3	
9 Tonnes of Traffic since Resurfacing (tonnes)	25,000	Range 0 - 250,000

Line 3 Fastener/Sleeper Type	
TD	Dogspike/Timber
TS	Screwspike/Timber
ET	Elastic/Timber
ES	Elastic/Steel
EC	Elastic/concrete
Line 8 Range of L/V	
0.1	Smooth riding wagon
0.2	Slightly hunting wagon
0.3	Moderately hunting wagon
0.4	Badly hunting wagon

**Bartlett Model** Valid for straight track only

**Predicted Rail Temperature at Buckling** 45 °C

Gambar 4. Tampilan Track Buckling Predictor ETI0606T-01 (Australian Rail Track Corporation Limited, 2017)

Tabel 2 memperlihatkan kriteria yang digunakan pada Track Buckling Predictor ETI0606T-01 untuk memprediksi temperatur saat rel mengalami *buckling*.

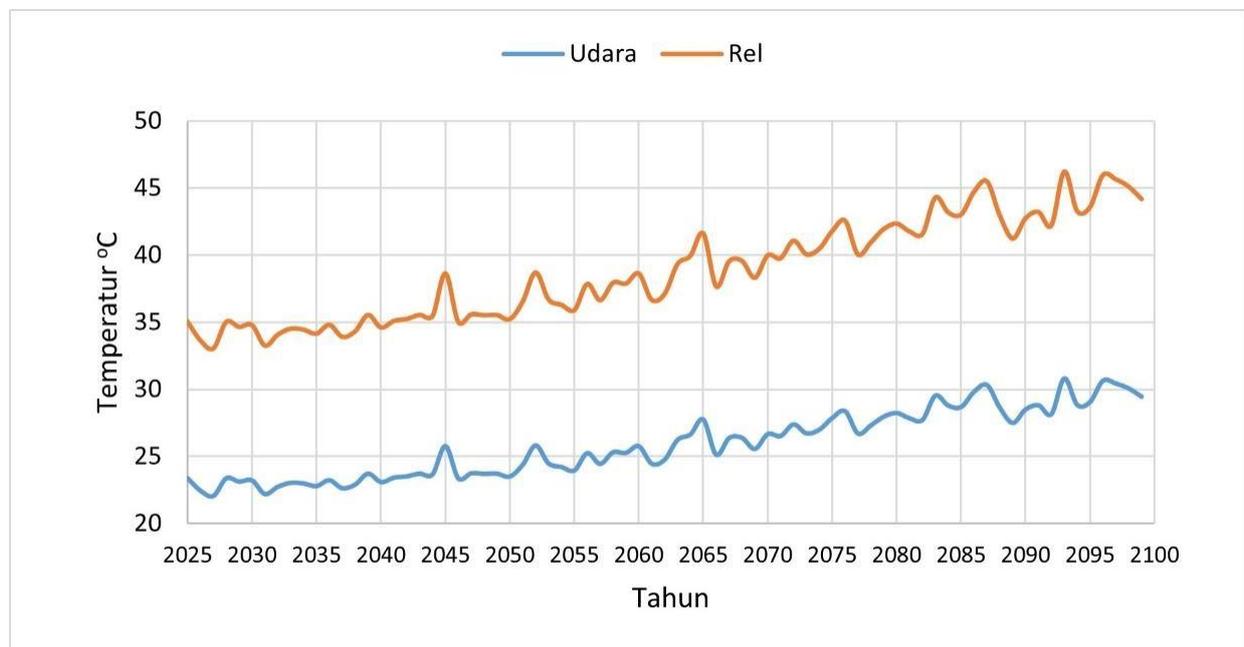
Tabel 2. Kriteria yang digunakan pada Track Buckling Predictor ETI0606T-01

Rail Weight	60 kg
Sleeper Spacing	660 mm
Type of Sleeper and Fastening	Elastic/concrete
Ballast Shoulder Width	300 mm
Length - Initial Misalignment	6 to 12 m
Amplitude - Initial Misalignment	30 mm
Rail - Actual Stress-Free Temperature	27 °C
Wagon L/V Ratio	0.3
Tonnes of Traffic since Resurfacing	40,000 tonnes

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Temperatur udara dan rel maksimum tahunan pada tahun 2025 sampai 2099 di Inggris Raya dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan grafik tersebut, temperatur udara maksimum tahunan di Britania Raya akan berfluktuasi antara tahun 2025 dan 2099. Temperatur tertinggi yang diproyeksikan sebesar 30.830 °C diperkirakan terjadi pada tahun 2093. Namun, di Britania Raya, temperatur udara maksimum tahunan yang diperkirakan diperkirakan akan naik dari 23.367 °C pada tahun 2025 menjadi 29.462 °C pada tahun 2099. Kenaikan temperatur udara maksimum tahunan juga menyebabkan peningkatan pada temperatur rel maksimum tahunan, yang nilainya dapat diketahui menggunakan Persamaan (1).

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, temperatur tahunan tertinggi yang tercatat di rel pada tahun 2025 adalah 35.050 °C, dan diproyeksikan akan naik menjadi 44.193 °C pada tahun 2099. Pada tahun 2093, temperatur rel maksimum tahunan terbesar diproyeksikan pada 46.245 °C.



Gambar 5. Proyeksi temperatur udara dan rel maksimum tahunan (2025-2099) di Inggris Raya

Dari Gambar 5 dapat diketahui bahwa suhu rel selalu lebih tinggi dari suhu udara sekitarnya. Hal ini disebabkan karena rel terbuat dari baja yang mempunyai konduktivitas termal yang lebih tinggi dari udara. Berdasarkan Astuti (2015), konduktivitas termal baja sebesar 50,2 W/m.K, sedangkan konduktivitas termal udara sebesar 0,024 W/m.K. Hal ini berarti bahwa rel dapat menyerap panas yang didapatkan dari sinar matahari lebih cepat dibandingkan udara.

Tabel 3. Temperatur *buckling* untuk panjang gelombang 6 hingga 12 m

Panjang gelombang <i>initial misalignment</i> (m)	Temperatur <i>buckling</i> (°C)
6	45
7	46
8	47
9	49
10	52
11	55
12	59

Kemudian berdasarkan perhitungan yang dilakukan menggunakan Track Buckling Predictor ETI0606T-01, dihasilkan prediksi temperatur *buckling* seperti dapat dilihat pada Tabel 3. Setelah membandingkan temperatur *buckling* rel dengan perkiraan temperatur rel yang dihitung sebelumnya, dapat dilihat bahwa temperatur rel maksimum yang diproyeksikan untuk tahun 2025–2099 adalah 46,245 °C pada tahun 2093, lebih tinggi daripada temperatur *buckling* 45 °C untuk panjang gelombang 6 m dan 46 °C untuk panjang gelombang 7 m. Temperatur rel yang lebih tinggi daripada temperatur *buckling* mempunyai arti bahwa pada kondisi tersebut rel kereta api telah mengalami *buckling* yang dapat membahayakan perjalanan kereta api yang melintasinya.

#### 4 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan dan rekomendasi sebagai berikut:

- Ada kemungkinan besar terjadi *rail buckling* di masa mendatang pada jalur perkeretaapian di Inggris Raya, terutama pada tahun 2093.
- Semakin besar panjang gelombang *initial misalignment*, maka semakin besar pula temperatur yang harus dicapai untuk terjadinya *rail buckling*.
- Perlu dilakukan penelitian terkait metode pencegahan *rail buckling* untuk diterapkan pada jalur perkeretaapian di Inggris Raya dalam menghadapi kenaikan temperatur udara di masa depan.

#### REFERENSI

- Astuti, I.A.N. (2015). "Penentuan Konduktivitas Termal Logam Tembaga, Kuningan, dan Besi dengan Metode Gandengan." *Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Pendidikan Fisika (SNFPF) Ke-6 2015*, 6(1), 30-34.
- Atapin, V., Bondarenko, A., Sysyn, M., & Grün, D. (2022). "Monitoring and Evaluation of the Lateral Stability of CWR Track." *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(1), 319–332.
- Australian Rail Track Corporation Limited. (2017). *Track Buckling Predictor: ETI-06-06*. www.artc.com.au
- Choi, W., Song, M. J., Lim, N.-H., & Lee, S. Y. (2019). "Microstructure and Mechanical Properties of Continuous Welded 50N Rail." *Korean Journal of Metals and Materials*, 57(12), 755–763.
- Dobney, K., Baker, C.J., Quinn, A.D. & Chapman, L. (2009). "Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom." *Meteorological Applications*, 16(2), 245–251.
- Enshaecian, A., & Rizzo, P. (2021). "Stability of continuous welded rails: A state-of-the-art review of structural modeling and nondestructive evaluation." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 235(10), 1291–1311.
- Jones, D. R. H., & Ashby, M. F. (2019). "Thermal Expansion." *Engineering Materials 1*, 501–513.
- Kabo, E., & Ekberg, A. (2024). "Characterisation of track buckling resistance." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*.
- Khatibi, F., Esmacili, M., & Mohammadzadeh, S. (2020). "Numerical investigation into the effect of ballast properties on buckling of continuously welded rail (CWR)." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 235(7), 866–875.

Kish, A., & Samavedam, G. (2013). *Track Buckling Prevention: Theory, Safety Concepts, and Applications*, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, U.S.A.

Met Office. (2018). *Product Form - UKCP*. [https://ukclimateprojections- ui.metoffice.gov.uk/products/form/MS4\\_ESL\\_Plot\\_01](https://ukclimateprojections- ui.metoffice.gov.uk/products/form/MS4_ESL_Plot_01)

Met Office. (2023). *How does the weather impact the railways? | Official blog of the Met Office news team*. <https://blog.metoffice.gov.uk/2023/04/19/how-does-the-weather-impact-the-railways/>

Rail Accident Investigation Branch. (2016). *Rail Accident Report: Derailment of a freight train near Langworth, Lincolnshire*, Department of Transport, Derby, United Kingdom.