

# REVIU SENSOR UNTUK PENDETEKSI PEMBENGGOKAN REL AKIBAT PERUBAHAN IKLIM

M.F.A. SUHARTANTO<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: mfarisariefsuhartanto@mail.ugm.ac.id

## INTISARI

Transportasi kereta api menghadapi tantangan, antara lain rel tekuk akibat metode *Continuous Welded Rail (CWR)*. Pemasangan CWR memiliki kelemahan seperti tekanan termal, memerlukan Suhu Netral Rel (RNT) tertentu. Perubahan suhu yang ekstrem menimbulkan kekhawatiran, menyebabkan kerusakan dan berkurangnya ketersediaan layanan kereta. Tindakan preventif sangat penting untuk mencegah terjadinya tekuk rel akibat perubahan suhu yang ekstrem. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau teknologi pemantauan jarak jauh yang canggih untuk rel tekuk. Metodologi yang digunakan yaitu studi tinjauan literatur, pengumpulan data sekunder, dan analisis teknologi yang menjanjikan. Penelitian ini mengeksplorasi dua teknologi yang menjanjikan untuk pemantauan jarak jauh rel tekuk: metode visi non-kontak dengan teknologi Digital Image Correlation (DIC) dan sensor Fiber Bragg Gratings (FBG). Teknologi DIC mengukur deformasi dan perubahan bentuk tanpa kontak fisik, sehingga mengurangi kerusakan pada sistem rel. Sensor FBG mendeteksi perubahan suhu dan deformasi pada objek atau struktur, memungkinkan distribusi beban dan analisis tegangan tarik.

Kata kunci: Rel Tekuk, Perubahan Iklim, Sensor.

## 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kereta api merupakan salah satu mode transportasi yang diminati oleh masyarakat, namun memiliki beberapa isu, salah satunya adalah *rail buckling*. Hal ini terjadi karena rel dipasang dengan menggunakan proses Continuous Welded Rail (CWR) untuk membentuk satu jalur rel yang panjang. Namun, karena stres termal dapat terjadi di sepanjang rel, pemasangan CWR memerlukan suatu *Rail Neutral Temperature (RNT)* tertentu (Sun et al., 2022). Struktur rel dapat mengalami kerusakan. Jalur kereta api juga memiliki resistansi lateral, yang menyebabkan rel membengkok jika Gaya berat Lateral lebih besar dari resistansi lateral (Takahashi et al., 2019).

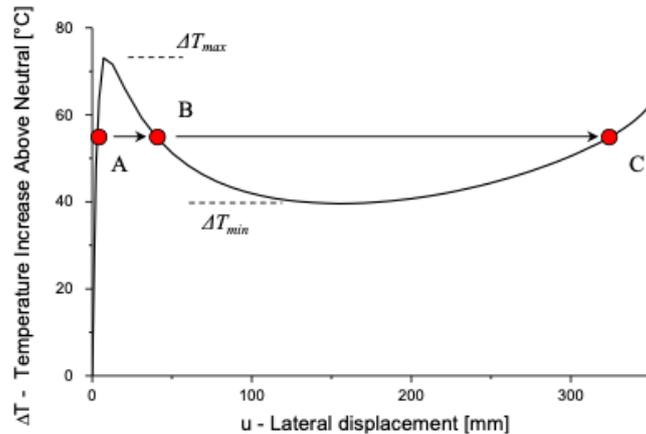
Peningkatan suhu yang disebabkan oleh perubahan iklim dapat mempercepat kerusakan pada jalur kereta api, dan meningkatnya kejadian cuaca ekstrem dapat menyebabkan gangguan jaringan rel, menurunkan reliabilitas, dan mengurangi aksesibilitas (Sanchis et al., 2020). Karena material rel terbuat dari baja padat, suhu di rel kereta api dapat lebih tinggi daripada suhu udara sekitar. Perubahan ekstrem ini menyebabkan resistansi rel menurun, berdampak pada kemungkinan terjadinya derailment. Tindakan pencegahan sangat penting untuk mengatasi masalah ini.

Pemantauan yang canggih diperlukan untuk mencegah *rail buckling*. Namun, pemantauan *rail buckling* saat ini masih sangat tradisional, yang dapat memakan waktu, memerlukan tenaga kerja yang banyak, mahal, dan kurang canggih. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk meninjau teknologi canggih yang memungkinkan pemantauan jarak jauh terhadap *rail buckling*.

### 1.2 Teori dan Konsep

Perubahan iklim telah diidentifikasi sebagai faktor kontributor terjadinya pembengkokan rel. Peningkatan suhu global telah meningkatkan kejadian cuaca ekstrem, termasuk gelombang panas, yang dapat menyebabkan rel memuai melebihi kapasitasnya. Menurut Sa'adin et al. (2016), cuaca ekstrem menjadi masalah serius bagi proyek infrastruktur, terutama rel kereta api, karena dapat menyebabkan korban jiwa, cedera, dan kerusakan properti seperti pembengkokan rel akibat suhu tinggi. Perubahan suhu ekstrem juga dapat menyebabkan kegagalan kereta. Menurut Palin et al. (2013), gaya yang dihasilkan oleh perluasan baja rel dalam kondisi panas dan kontraksi dalam kondisi dingin dapat menyebabkan kerusakan pada jalur kereta api.

Pembengkokan rel dapat terjadi akibat perubahan suhu yang signifikan, bukan hanya suhu rel tetapi juga suhu di lokasi jalur kereta api. Rel baja memuai karena penyerapan panas saat suhu naik. Di sisi lain, rel memendek saat suhu lebih dingin. Menurut Pucillo G (2019), kondisi yang dapat memicu pembengkokan progresif jalur adalah ketika  $\Delta T_{max}$  dan  $\Delta T_{min}$  pada rel meningkat akibat jarak sumbu dan radius kurva. Penjelasan keseimbangan pembengkokan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Penjelasan Kurve Keseimbangan Pembengkokan Rel (Pucillo G, 2019)

## 2 METODOLOGI

### 2.1 Pendekatan Studi Literatur

Penilaian menyeluruh pada penelitian ini dibuat secara metodis untuk menerangi latar belakang, mengungkapkan kesenjangan pengetahuan saat ini, dan membuka jalan menuju wawasan inovatif. Tujuan utama dari evaluasi literatur ini adalah mengumpulkan wawasan signifikan, menemukan pola, menentukan metodologi yang digunakan, dan menggali temuan penting yang dapat menjadi landasan bagi penelitian saat ini. Penulis juga mengumpulkan informasi melalui jurnal, artikel, dan sumber informasi faktual dan dapat dipercaya tentang teknologi yang menjanjikan jika diimplementasikan untuk mengatasi masalah pemantauan *rail buckling*. Beberapa jurnal yang dikumpulkan berasal dari lingkungan kereta api dan dari luar sektor kereta api.

### 2.2 Pengumpulan dan Pemilihan Data Sekunder

Kebutuhan data sekunder dalam penelitian ini adalah produk teknologi dengan kecanggihan untuk mendeteksi rel yang membengkok. Alat-alat ini dapat berupa sensor suhu, kamera termal, sensor serat optik, atau kombinasi dari beberapa alat. Pengumpulan data sekunder penting untuk menghasilkan wawasan mendalam tentang topik ini. Data sekunder adalah informasi yang sebelumnya dikumpulkan oleh pihak lain, termasuk studi sebelumnya, publikasi ilmiah, laporan teknis, dan data statistik terkait sensor membengkok. Penelitian ini membangun dasar pengetahuan yang kokoh untuk mengembangkan metode eksperimental yang lebih efektif, memperkuat analisis perbandingan, dan mengidentifikasi celah pengetahuan yang dapat dieksplorasi lebih lanjut dengan menganalisis data sekunder yang sudah ada.

Dari beberapa data yang diperoleh, langkah berikutnya adalah memilih informasi dan data mana yang dapat digunakan sebagai materi untuk dikembangkan sebagai tulisan. Data dan informasi yang diperoleh kemudian dipilih berdasarkan tingkat relevansi dan akurasi untuk membentuk dasar penelitian yang akan dikembangkan lebih lanjut.

## 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Hasil

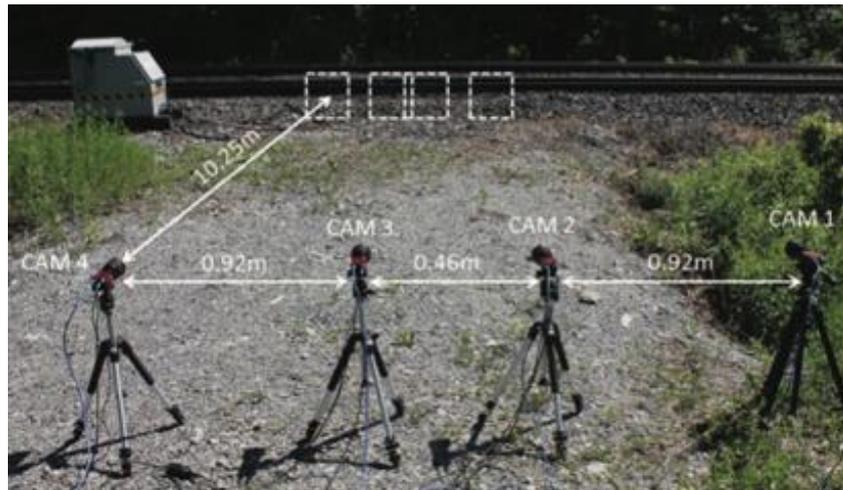
#### 3.1.1 Metode Visi Non-Kontak dengan Teknologi Digital Image Correlation (DIC)

Dengan menggunakan teknologi pemrosesan gambar, Metode Visi Non-Kontak dengan Teknologi Digital Image Correlation (DIC) merupakan pendekatan yang digunakan untuk mengukur deformasi dan perubahan bentuk objek

tanpa kontak fisik. Dalam satu prosedur pengumpulan data, perangkat pengumpulan data Stereo-DIC mengumpulkan pengukuran lengkap tentang bentuk, kelengkungan, deformasi, dan regangan (Knopf, 2019).

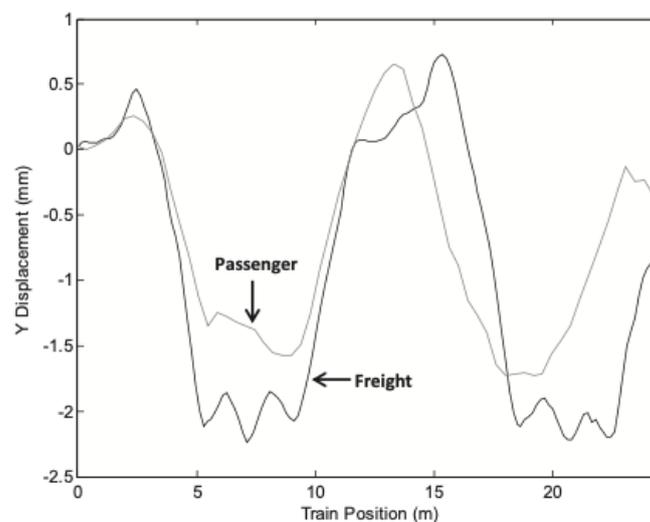
Secara umum, teknologi DIC memiliki perangkat yang saling melengkapi. Perangkat-perangkat ini meliputi kamera digital, pencahayaan, peralatan komputer, perangkat lunak pemrosesan data, target kalibrasi, dan penstabil pemasangan. Menurut Knopf (2019), DIC memungkinkan pengukuran tanpa merusak dan tanpa intrusi, mengurangi kebutuhan untuk kontak fisik dengan rel, dan meminimalkan potensi kerusakan atau gangguan pada sistem rel.

Teknologi DIC juga telah diterapkan melalui uji coba pemantauan jalur rel untuk menentukan tingkat pergeseran vertikal dan longitudinal. Murray et al. (2015) menyatakan bahwa tekstur yang digunakan pada rel meningkatkan kemudahan pemantauan jarak jauh dan jarak aman dari rel saat pemantauan, sehingga menghilangkan pemantauan konvensional. Contoh penerapan sensor DIC dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Posisi Kamera untuk *Monitoring* Jalur Rel Kereta (Murray et al., 2015)

Subset yang dipasang sebagai target untuk kamera DIC untuk mengambil gambar berada pada badan rel. Selain itu, aluminium dipasang sebagai subset dari bantalan rel untuk melihat pergeseran rel ketika kereta melintasi titik objek. Kondisi awal jalur (sebelum kereta melintas) akan digunakan sebagai subset referensi. Serangkaian gambar diambil secara berurutan menggunakan kamera untuk merekam perubahan deformasi pada rel. Data ditangkap oleh kamera DIC dan dibandingkan dalam bentuk pergeseran vertikal dan pergeseran longitudinal. Rincian grafis dapat dilihat pada Gambar 3.

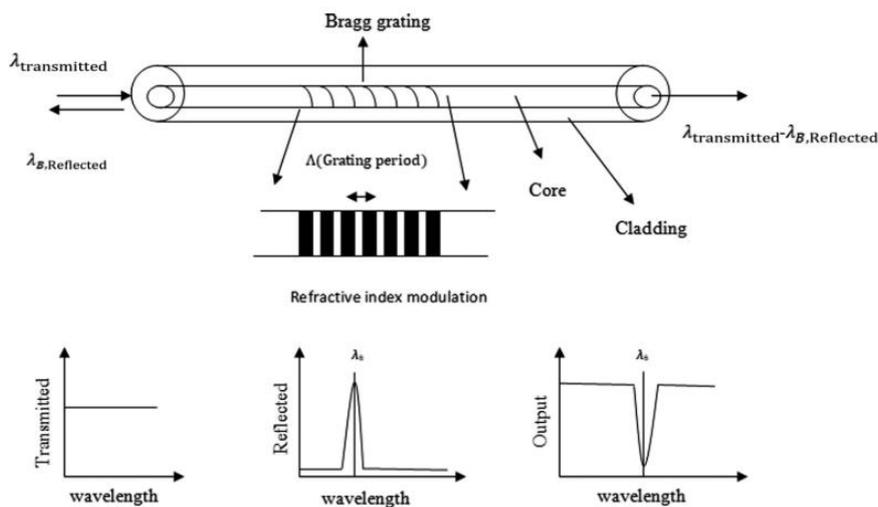


Gambar 3. Hasil Pengambilan Data oleh Teknologi Digital Image Correlation (DIC) (Murray et al., 2015)

3.1.2 Sensor Fiber Bragg Gratings (FBG)

Fiber Bragg Grating (FBG) adalah sensor serat optik yang berfungsi untuk mengukur perubahan suhu atau deformasi pada suatu objek atau struktur. Menurut Leung C et al. (2015), sensor Fiber Bragg Gratings dapat mendeteksi regangan longitudinal, yang kemudian digunakan untuk memperkirakan atau menghitung regangan. Konsep dasar dari Fiber Bragg Gratings melibatkan pembentukan grating periodik di inti serat optik. Ketika cahaya memasuki serat optik ini, cahaya dipantulkan oleh grating dengan panjang gelombang tertentu (Campanella C et al., 2018). Ketika lingkungan mengalami perubahan suhu atau deformasi, periodisitas grating berubah, memengaruhi panjang gelombang cahaya yang dipantulkan. Sebagai hasilnya, cahaya yang dipantulkan mengalami interferensi, yang dapat diukur untuk menghitung perubahan suhu atau deformasi di sekitar sensor Fiber Bragg Gratings.

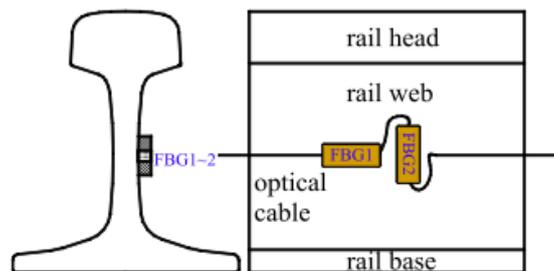
Teknologi Fiber Bragg Gratings telah banyak digunakan dalam pemantauan struktur seperti jembatan, gedung, dan jenis struktur lain dengan masalah gaya regang. Ketika diterapkan pada jembatan, FBG dapat mendeteksi distribusi beban akibat perubahan degradasi dengan memantau variasi abnormal dalam tegangan tarik pada kabel yang disebabkan oleh beban dan suhu (Leung C et al., 2015). Teknologi FBG, saat menerima transmisi, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Penjelasan tentang bagian struktural dari Fiber Bragg Gratings ketika menerima transmisi, refleksi, dan menghasilkan output (Sahota J et al., 2020)

Sensor FBG yang terintegrasi ke dalam rel kereta api dapat memberikan informasi waktu nyata tentang suhu, stres, dan deformasi rel, sehingga memungkinkan deteksi dini terhadap potensi kerusakan atau masalah keamanan (Du C et al., 2020). Dengan teknologi FBG, pemantauan rel kereta api menjadi lebih akurat dan responsif, mengurangi risiko gangguan layanan dan meningkatkan keselamatan operasional.

Contoh penerapan Fiber Bragg Gratings dalam struktur rel kereta api adalah untuk mengukur gaya longitudinal. Menurut Wang P et al. (2015), sensor *bi-directional* fiber Bragg gratings digunakan untuk mengukur gaya longitudinal yang dihasilkan oleh kereta pada Continuous Welded Rail (CWR) dengan memasang sensor secara horizontal dan vertikal. Ilustrasi pemasangan alat dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Sensor Fiber Bragg Gratings pada Rel Kereta untuk mengukur Gaya Longitudinal (Wang P et al., 2015)

### 3.2 Pembahasan

#### 3.2.1 Keunggulan Teknologi Digital Image Correlation (DIC)

Keunggulan dari sensor Digital Image Correlation (DIC) adalah kemampuannya untuk memantau objek tanpa menyentuh atau berkontak langsung dengan objek yang sedang diteliti (Knopf, 2019). Sensor ini dapat menangkap regangan termal dan longitudinal pada permukaan rel. Sensor ini juga dapat menangkap permukaan objek dengan resolusi tinggi karena didukung oleh spesifikasi lensa yang canggih. Keunggulan berikutnya adalah bahwa teknologi ini dapat digunakan untuk objek yang melengkung maupun datar (Knopf, 2019). Dengan demikian, alat ini dapat diterapkan pada lintasan kereta api dengan potensi *rail buckling* tinggi, seperti lintasan kurva atau lintasan lurus.

Peluang dari teknologi sensor DIC adalah meningkatkan keselamatan. Berdasarkan Hodge et al. (2015), teknologi sistem pemantauan sensor dapat menjadi sistem peringatan dini untuk mencegah kegagalan atau gangguan dalam operasi rel. Dengan mengidentifikasi deformasi secara dini, operator rel dapat mengatasi masalah sebelum menjadi masalah kritis. Peluang kedua adalah meningkatkan efisiensi dalam operasi kereta. Mengetahui jadwal pemantauan yang diatur berdasarkan data yang diperoleh dari sensor DIC dapat meningkatkan efisiensi operasional tanpa gangguan pada layanan rel.

#### 3.2.2 Keunggulan Sensor Fiber Bragg Gratings (FBG)

Keuntungan pertama dari Sensor Fiber Bragg Gratings adalah sensor ini bersifat non-intrusif. Dalam aplikasinya, sensor FBG dapat mengukur regangan (Kerrouche et al., 2008; Leung C et al., 2015), suhu (Kerrouche et al., 2008; Filograno et al., 2012), dan perpindahan serta gaya longitudinal (Du C et al., 2020). Oleh karena itu, FBG memiliki fungsi multifungsi yang sangat fleksibel karena didukung oleh alat integrator yang menerapkan beberapa fungsi teknologi untuk mendukung sensor FBG. Keuntungan kedua adalah kemampuannya mendeteksi secara *real-time*. Ketika terjadi perubahan suhu atau regangan pada rel kereta api, FBG dapat segera mendeteksi besarnya perubahan; kemudian, data tersebut akan menjadi peringatan dini yang muncul di stasiun kontrol. Sensor FBG dapat diintegrasikan dengan teknologi yang lebih canggih. Sebagai contoh, dapat menggunakan penyimpanan data online untuk sistem penyimpanan data, sehingga tidak memerlukan *hard disk* atau penyimpanan data yang memerlukan perangkat keras. Peluang lainnya adalah bahwa sensor FBG dapat digunakan untuk pemantauan jarak jauh. Pemantauan jarak jauh ini memudahkan insinyur untuk tidak lagi menggunakan mata langsung dan memeriksa rel dengan cara konvensional. Ini juga dapat meningkatkan keamanan dan keselamatan pekerja dan perjalanan kereta, mengurangi gangguan rel.

**Tabel 1. Kelebihan dan Peluang dari Penerapan Sensor**

Indikator	Digital Image Correlation (DIC)	Fiber Bragg Gratings (FBG)
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bersifat non-kontak</li> <li>Dapat digunakan untuk objek yang melengkung maupun datar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bersifat non-intrusif</li> <li>Multifungsi (dapat mendeteksi regangan, suhu, gaya longitudinal, dan perpindahan)</li> <li>Mendeteksi secara <i>real-time</i></li> </ul>
Peluang	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dapat menjadi sistem peringatan dini</li> <li>Meningkatkan efisiensi dalam operasi kereta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dapat digunakan untuk pemantauan jarak jauh</li> </ul>

## 4 KESIMPULAN

Hubungan antara kemunculan rel yang membengkok dan perubahan iklim menunjukkan korelasi yang signifikan. Penjelasan dalam penelitian ini menekankan bahwa perubahan cuaca berdampak substansial pada daya tahan dan kerentanan rel, meningkatkan kemungkinan terjadinya rel yang membengkok. Selain dari efek merugikan perubahan cuaca, masalah rel yang membengkok disebabkan oleh penurunan struktur rel dan gesekan antara rel dan struktur bantalan. Struktur rel yang kuat meningkatkan resistensi terhadap gaya lateral dan longitudinal, sementara pelatuk tidur dan pembentukan bantalan menerima gaya lateral.

Dari hasil diskusi, dua teknologi yang menjanjikan memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai alat deteksi rel yang membengkok, yaitu Metode Visi Non-Kontak dengan Teknologi Digital Image Correlation (DIC) dan Sensor Fiber Bragg Gratings. Teknologi DIC memungkinkan pengukuran tanpa merusak dan non-intrusif, meminimalkan kerusakan sistem rel. Ini digunakan dalam pemantauan jalur rel untuk menilai tingkat perpindahan. Tekstur pada rel meningkatkan pemantauan jarak jauh dan jarak dari rel, mengurangi kebutuhan untuk pemantauan konvensional. Fiber Bragg Grating (FBG) adalah sensor serat optik yang mengukur perubahan suhu atau deformasi dalam suatu objek atau struktur. Ini mendeteksi regangan dan regangan longitudinal, yang kemudian digunakan untuk memperkirakan atau menghitung regangan. FBG melibatkan grating periodik di inti serat optik, di mana cahaya dipantulkan dengan panjang gelombang tertentu. Ketika lingkungan berubah, periodisitas grating memengaruhi panjang gelombang cahaya yang dipantulkan, menyebabkan interferensi dan mengukur perubahan suhu atau deformasi di sekitar sensor.

Untuk pengembangan penelitian lebih lanjut, perencanaan konsep untuk sistem pemantauan rel yang membengkok jarak jauh menggunakan teknologi DIC dan FBG dapat dilakukan, serta bagaimana penerapannya di lapangan. Tujuannya adalah untuk menemukan kelebihan dan kekurangan teknologi sensor ini di lapangan.

## REFERENSI

- Campanella, C. E., Cuccovillo, A., Campanella, C., Yurt, A., & Passaro, V. M. N. (2018). Fibre Bragg Grating based strain sensors: Review of technology and applications. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 18, Issue 9).
- Du, C., Dutta, S., Kurup, P., Yu, T., & Wang, X. (2020). A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. In *Sensors and Actuators, A: Physical* (Vol. 303). Elsevier B.V.
- Filograno, M. L., Corredera Guillén, P., Rodríguez-Barrios, A., Martín-López, S., Rodríguez-Plaza, M., Andrés-Alguacil, Á., & González-Herráez, M. (2012). Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors. *IEEE Sensors Journal*, 12(1), 85–92
- Hodge, V. J., O’Keefe, S., Weeks, M., & Moulds, A. (2015). Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), 1088–1106.
- Jones, E. M. C., & Reu, P. L. (2018). Distortion of Digital Image Correlation (DIC) Displacements and Strains from Heat Waves. *Experimental Mechanics*, 58(7), 1133–1156.
- Kerrouche, A., Boyle, W. J. O., Gebremichael, Y., Sun, T., Grattan, K. T. V., Täljsten, B., & Bennitz, A. (2008). Field tests of fibre Bragg grating sensors incorporated into CFRP for railway bridge strengthening condition monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 148(1), 68–74
- Knopf, K. (2019). A Non-Contacting System for Rail Neutral Temperature and Stress Measurements. (Online), (<https://scholarcommons.sc.edu/etd>, accessed 15 August 2023)
- Leung, C. K. Y., Wan, K. T., Inaudi, D., Bao, X., Habel, W., Zhou, Z., Ou, J., Ghandehari, M., Wu, H. C., & Imai, M. (2015). Review: optical fiber sensors for civil engineering applications. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(4).
- Murray, C. A., Andy Take, W., & Hoult, N. A. (2015). Measurement of vertical and longitudinal rail displacements using digital image correlation. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(2).
- Palin, E. J., Thornton, H. E., Mathison, C. T., McCarthy, R. E., Clark, R. T., & Dora, J. (2013). Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain. *Climatic Change*, 120(1–2), 71–93.
- Pucillo, G. P. (2019). Train-Induced Load Effects On The Thermal Track Buckling. <http://asmedigitalcollection.asme.org/JRC/proceedings-pdf/JRC2019/58523/V001T01A014/5171089/v001t01a014-jrc2019-1276.pdf>
- Sa’adin, S. L. B., Kaewunruen, S., & Jaroszweski, D. (2016). Risks of climate change with respect to the Singapore-Malaysia high-speed rail system. In *Climate* (Vol. 4, Issue 4).
- Sahota, J. K., Gupta, N., & Dhawan, D. (2020). Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review. *Optical Engineering*, 59(06).
- Sanchis, I. V., Franco, R. I., Zuriaga, P. S., & Fernández, P. M. (2020). Risk of increasing temperature due to climate change on operation of the Spanish rail network. *Transportation Research Procedia*, 45, 5–12.
- Sun, F., Hoult, N. A., Butler, L. J., & Zhang, M. (2022). Distributed monitoring of rail lateral buckling under axial loading. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12(4), 757–774.
- Takahashi, R., Hayano, K., Nakamura, T., & Momoya, Y. (2019). Integrated risk of rail buckling in ballasted tracks at transition zones and its countermeasures. *Soils and Foundations*, 59(2).
- Wang, P., Xie, K., Shao, L., Yan, L., Xu, J., & Chen, R. (2015). Longitudinal force measurement in continuous welded rail with bi-directional FBG strain sensors. *Smart Materials and Structures*, 25(1).