

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Moda transportasi kereta api memegang peranan vital dalam sistem logistik dan mobilitas penumpang di Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), jumlah penumpang kereta api mencapai 369,8 juta orang pada periode 2023, yang berimplikasi langsung pada peningkatan beban mekanis dan termal pada infrastruktur rel. Stabilitas geometri rel menjadi prasyarat mutlak (*absolute prerequisite*) untuk keselamatan perjalanan, karena kegagalan struktur akibat deformasi dapat berakibat fatal pada keamanan operasional [1].

Data Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) mengonfirmasi bahwa anjlokkan (*derailment*) merupakan jenis kecelakaan paling dominan, yang sering kali dipicu oleh deformasi rel akibat ekspansi termal saat suhu ekstrem. Perubahan suhu material rel yang signifikan menyebabkan tegangan internal yang memicu perubahan dimensi fisik. Saat ini, metode inspeksi masih didominasi oleh pengamatan visual periodik yang memiliki jeda waktu (*blind spot*), sehingga diperlukan sistem pemantauan kontinu berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mendeteksi anomali secara *real-time* [2].

Dalam penelitian ini, dirancang sebuah sistem akuisisi data menggunakan mikrokontroler ESP32 yang mengintegrasikan sensor DHT22 untuk suhu udara dan sensor NTC 10k *Glass Bead* untuk suhu material rel. Untuk mendeteksi regangan mekanis secara presisi, digunakan sensor *Strain Gauge BF350* yang dikonfigurasi dengan jembatan *Wheatstone* dan diperkuat oleh *Y3 Weighing Amplifier*. Sinyal analog dari deformasi fisik dikonversi menjadi data digital mikrostrain ( $\mu\epsilon$ ) untuk kemudian ditransmisikan secara nirkabel melalui jaringan Wi-Fi.

Data yang dikirimkan oleh ESP32 dikelola oleh Flask API yang berfungsi sebagai jembatan komunikasi antara perangkat keras dan model kecerdasan buatan. Di dalam lingkungan Flask tersebut, algoritma *Random Forest Regressor* diimplementasikan sebagai *soft sensor* untuk memprediksi nilai deformasi

berdasarkan pola suhu dan kelembapan yang diterima. Penggunaan *Random Forest* dinilai unggul karena kemampuannya menangani data non-linear dan memberikan tingkat akurasi yang tinggi dibandingkan regresi linear konvensional [3].

Seluruh hasil pemrosesan data dan prediksi deformasi kemudian ditampilkan secara dinamis melalui sebuah antarmuka *website*. Dengan integrasi antara sensor fisik, *cloud computing* melalui Flask API, dan visualisasi web, penelitian ini diharapkan dapat mendukung transisi skema perawatan berbasis waktu menuju perawatan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance*), sehingga risiko anjlok dan efisiensi perawatan infrastruktur perkeretaapian lebih optimal [4].

## 1.2 Penelitian Terkait

Penulisan terkait tinjauan literatur dan studi-studi sebelumnya yang relevan dengan topik penelitian menjadi acuan literasi dalam pembuatan tugas akhir ini. Referensi jurnal penelitian dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 Penelitian Terkait

Peneliti	Tahun	Judul
H. Kurniawan	2023	<i>Analisis Pengaruh Tegangan Termal Terhadap Deformasi Geometri Jalan Rel di Wilayah Kerja PT KAI</i>
A. Ramadhan dan S. Mulyono	2023	<i>Rancang Bangun Sistem Monitoring Regangan pada Rel Kereta Api Berbasis IoT Menggunakan Strain Gauge</i>
M. Zamhari, dkk.	2024	<i>Real-Time Structural Health Monitoring of Railway Tracks Using Low-Cost IoT Sensors</i>
S. Gupta, dkk.	2024	<i>Prediksi Indeks Kualitas Jalan Rel (Track Quality Index) Menggunakan Algoritma Random Forest</i>
J. M. W. Brownjohn, dkk.	2025	<i>Development of Machine Learning-Based Soft Sensors for Structural Strain Estimation</i>

Penelitian oleh Kurniawan (2023) dalam *Jurnal Perkeretaapian Indonesia* menganalisis korelasi antara fluktuasi suhu lingkungan dengan perubahan geometri pada jalan rel baja di wilayah kerja PT KAI. Temuan penelitian ini mengonfirmasi bahwa ekspansi termal pada siang hari secara signifikan meningkatkan risiko tegangan internal yang memicu deformasi lateral. Data empiris dari penelitian ini memberikan justifikasi kuat mengenai pentingnya pemantauan suhu material secara kontinu untuk mencegah fenomena rel melengkung (*buckling*) yang membahayakan keselamatan perjalanan [5].

Penelitian oleh Ramadhan dan Mulyono (2023) dalam *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer* merancang sistem akuisisi data regangan menggunakan *strain gauge* yang terintegrasi dengan jaringan nirkabel. Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan sensor resistif yang ditempelkan pada badan rel mampu menangkap dinamika regangan mekanis secara akurat. Metodologi pengkondisian sinyal yang diterapkan menjadi rujukan teknis dalam penggunaan jembatan *Wheatstone* untuk meminimalisir derau pada lingkungan operasional kereta api yang ekstrem [6].

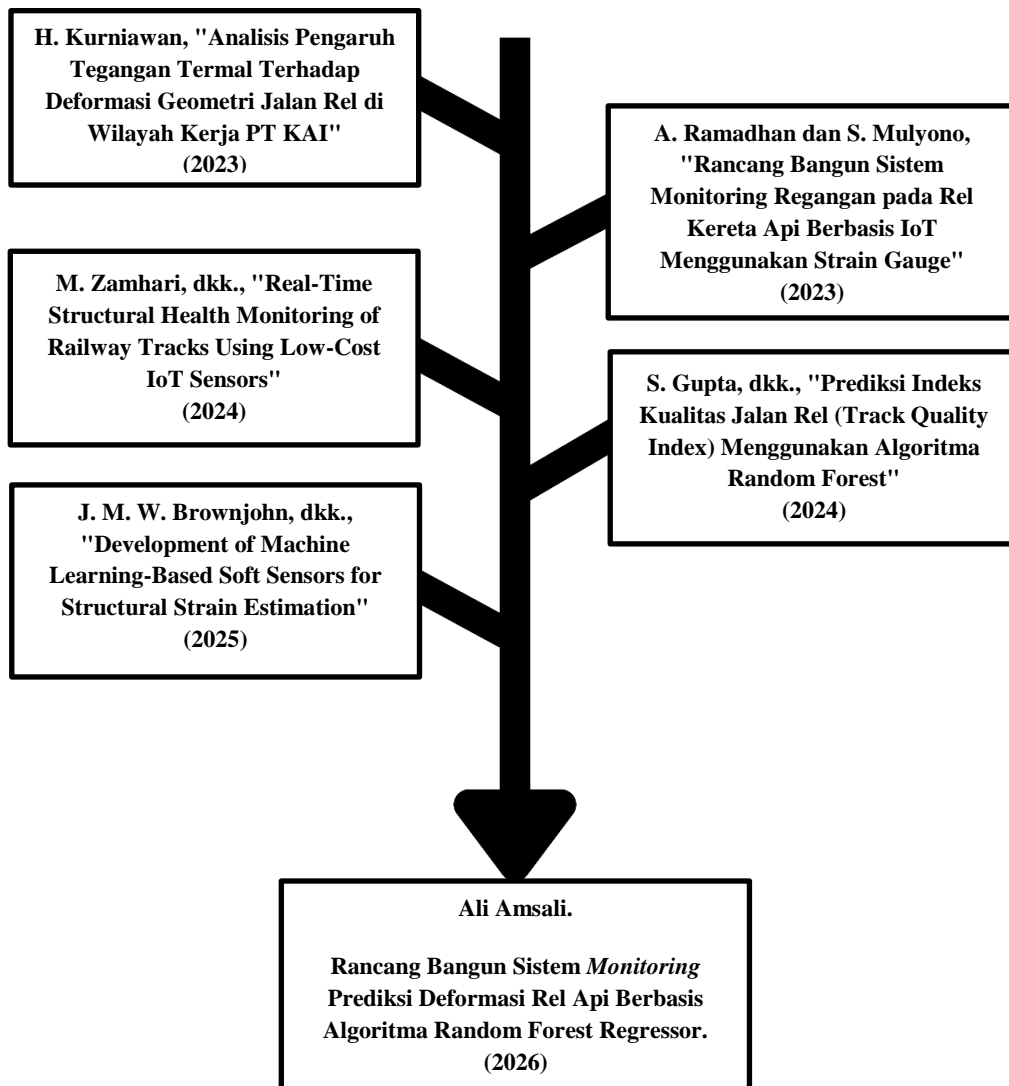
Penelitian oleh Zamhari dkk. (2024) mengevaluasi penggunaan algoritma *Random Forest* untuk memprediksi nilai *Track Quality Index* (TQI) berdasarkan parameter geometri rel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma *Random Forest* memiliki ketahanan yang tinggi terhadap data yang bervariasi dan mampu memberikan akurasi prediksi yang lebih stabil dibandingkan model regresi linear konvensional. Temuan ini mendukung penggunaan metode *ensemble learning* dalam mengolah data sensor infrastruktur transportasi yang bersifat non-linear [7].

Penelitian oleh Gupta dkk. (2024) dalam jurnal *Sensors* mengembangkan kerangka kerja *Structural Health Monitoring* (SHM) berbasis IoT dengan memanfaatkan mikrokontroler berbiaya rendah untuk pemantauan rel secara *real-time*. Temuan utama penelitian ini menekankan pada efisiensi arsitektur *edge computing* dalam mereduksi beban transmisi data ke *cloud server*. Penelitian ini membuktikan bahwa perangkat IoT kelas konsumen dapat dioptimalkan untuk kebutuhan industri perkeretaapian melalui manajemen daya dan protokol komunikasi yang tepat [8].

Penelitian oleh Brownjohn dkk. (2025) dalam *Philosophical Transactions of the Royal Society A* memperkenalkan konsep *soft sensor* berbasis *machine learning* untuk mengestimasi regangan struktural pada infrastruktur rel. Penelitian ini mendemonstrasikan bahwa dengan memanfaatkan input data lingkungan, model algoritma dapat memprediksi nilai regangan dengan tingkat presisi yang mendekati sensor fisik. Implementasi ini menjadi dasar bagi pengembangan sistem pemeliharaan prediktif yang lebih efisien karena mampu mengurangi ketergantungan pada pemasangan sensor fisik dalam jumlah besar di sepanjang jalur rel [9].

Berbeda dengan kelima penelitian terdahulu yang umumnya masih bergantung pada keberadaan sensor fisik secara permanen, penelitian ini mengintegrasikan perangkat keras IoT dan kecerdasan buatan melalui konsep *virtual sensing* atau *soft sensor*. Dalam arsitektur sistem ini, sensor *strain gauge* BF350 berperan krusial pada tahap pelatihan algoritma *Random Forest Regressor* sebagai instrumen pelabel data (*ground truth*), namun pada implementasi operasionalnya, sensor tersebut dieliminasi dari sistem fisik. Keunggulan metodologi ini terletak pada kemampuannya memprediksi nilai deformasi (regangan) secara akurat hanya dengan memanfaatkan input dari sensor DHT22 dan NTC 10k *glass bead*. Pendekatan ini secara teknis mengatasi keterbatasan fisis *strain gauge* yang memiliki durabilitas rendah dan kerentanan terhadap kerusakan mekanis saat dipasang permanen pada struktur rel, sekaligus menawarkan solusi pemantauan yang lebih tangguh, efisien secara biaya, dan memiliki usia pakai lebih panjang dalam skala implementasi industri.

Penelitian ini mengacu pada lima jurnal relevan yang membahas deformasi rel dan pemuai material serta penerapan *machine learning* untuk prediksi deformasi. Hubungan antarjurnal dan kontribusinya terhadap penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.1 yang memetakan bagaimana setiap jurnal mendukung berbagai aspek penelitian.



Gambar 1. 1 Hubungan Penelitian Terkait

### 1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan, ada beberapa masalah yang perlu dirumuskan:

1. Bagaimana rancang bangun sistem *monitoring* rel kereta api berbasis sensor suhu DHT22, sensor suhu NTC, dan sensor *strain gauge* untuk mendeteksi deformasi rel secara *real-time*?
2. Bagaimana kinerja algoritma *Random Forest Regressor* ketika digunakan untuk menganalisis data sensor dan memprediksi deformasi rel guna meningkatkan efektifitas pemeliharaan dan mengurangi risiko kegagalan struktural?

### 1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengembangkan sistem *monitoring* rel kereta api berbasis sensor suhu DHT22, sensor suhu NTC, dan sensor *strain gauge* untuk mendeteksi deformasi rel secara *real-time*.
2. Mengimplementasikan algoritma *Random Forest Regressor* guna memprediksi deformasi rel berdasarkan data sensor, sehingga dapat meningkatkan efektivitas pemeliharaan dan mengurangi risiko kegagalan struktural.

### 1.5 Manfaat

Pada penelitian ini terdapat dua manfaat yang ingin di capai yaitu:

1. Manfaat Akademis  
Penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan kajian tentang penerapan sensor dan algoritma *Random Forest Regressor* dalam sistem *monitoring* infrastruktur transportasi.
2. Manfaat Praktis  
Sistem yang dikembangkan dapat membantu operator kereta api dalam mendeteksi dini deformasi rel, sehingga memungkinkan pemeliharaan yang lebih efektif, mengurangi risiko kecelakaan, serta meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional transportasi kereta api.

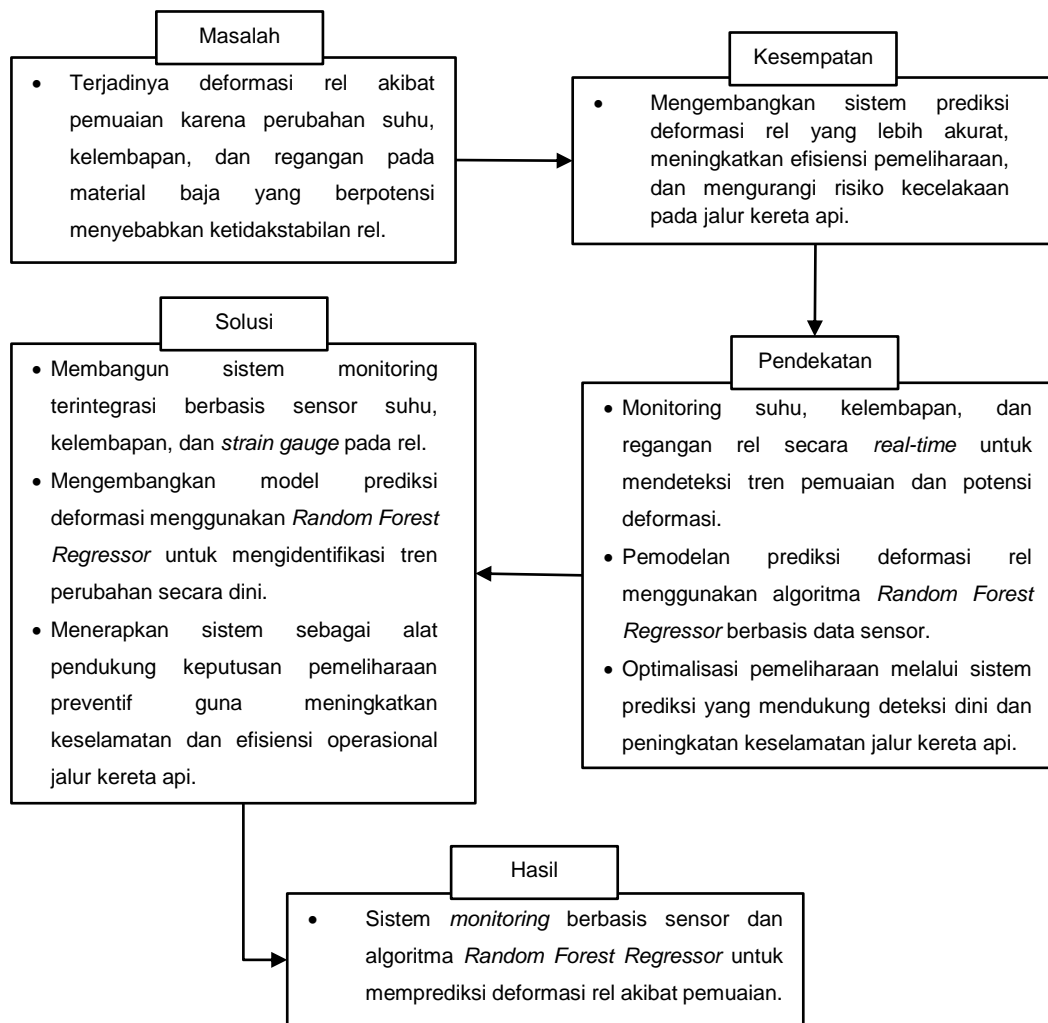
## 1.6 Batasan Masalah

Penelitian ini diharapkan mempunyai fokus penelitian yang jelas, sehingga perlu adanya batasan masalah untuk menghindari meluasnya topik. Batasan-batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya membahas pengaruh perubahan suhu, kelembapan, dan regangan rel terhadap pemuaian rel pada jenis material tertentu, seperti baja, tanpa mempertimbangkan faktor lain seperti beban lalu lintas, kondisi tanah, atau variasi material lain.
2. Penelitian ini menggunakan sensor DHT22, sensor NTC, dan sensor *strain gauge*, dengan fokus utama pada pemantauan perubahan suhu, kelembapan, dan regangan rel tanpa mempertimbangkan faktor eksternal lainnya.
3. Model prediksi menggunakan algoritma *Random Forest Regressor* berdasarkan data sensor yang dikumpulkan, dengan validasi terbatas pada dataset yang tersedia, sehingga akurasi model dapat dipengaruhi oleh keterbatasan jumlah dan kualitas data pelatihan.
4. Data yang digunakan untuk melatih dan menguji model prediksi mungkin terbatas pada jumlah, variasi, dan kualitas data yang tersedia selama penelitian, yang dapat mempengaruhi kemampuan model untuk generalisasi pada kondisi atau lokasi lain.
5. Prediksi yang dihasilkan oleh model *Random Forest Regressor* hanya ditujukan sebagai indikator untuk menunjukkan ada atau tidaknya tren perubahan deformasi (indikasi fluktuasi), bukan untuk memprediksi nilai deformasi kritis yang secara langsung menyebabkan kerusakan struktural atau kegagalan material pada rel.

## 1.7 Kerangka Berpikir

Penelitian ini menganalisis deformasi rel akibat suhu dan kelembapan dengan sensor DHT22, NTC, dan strain gauge. Data diproses menggunakan Random Forest Regressor untuk memprediksi deformasi secara akurat, sehingga pemeliharaan dapat dilakukan lebih dini dan efisien. Proses pengukuran dan analisis ditunjukkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1. 2 Kerangka berpikir penelitian

### 1.8 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan adalah aturan penyusunan data dan teks secara terstruktur untuk menghasilkan karya ilmiah yang jelas, sistematis, dan akurat. Dengan sistematika yang tepat, ide penelitian tersaji terorganisir, memudahkan pembaca, serta memastikan keterkaitan antarbagian. Pemahaman sistematika ini penting bagi penyusunan laporan penelitian yang efektif. Sistematika penulisan laporan penelitian ini terdiri dari:

## **BAB I: PENDAHULUAN**

Berisi latar belakang penelitian, pentingnya topik, rumusan masalah, tujuan, batasan, manfaat, serta ruang lingkup penelitian. Bab ini memberikan konteks dan arah penelitian.

## **BAB II: DASAR TEORI**

Membahas konsep pengukuran deformasi rel dengan sensor (DHT22, NTC 10k *Glass, strain gauge*), teori deformasi, prinsip *Random Forest Regressor*, serta teori pembuatan *website* interaktif. Disertai tinjauan pustaka untuk memperkuat landasan teoritis.

## **BAB III: METODOLOGI PENELITIAN**

Menjelaskan langkah perancangan sistem *monitoring* rel berbasis mikrokontroler, pengumpulan data sensor, dan analisis menggunakan *Random Forest Regressor* untuk prediksi deformasi rel.

## **BAB IV: PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI**

Menguraikan desain perangkat keras (sensor, mikrokontroler, modul komunikasi) dan perangkat lunak (algoritma, antarmuka *website*). Bab ini menekankan integrasi sistem agar bekerja *real-time*.

## **BAB V: PENGUJIAN DAN ANALISIS**

Menyajikan hasil uji sistem, akurasi prediksi deformasi, serta evaluasi kinerja dari aspek keandalan, dan konsistensi.

## **BAB VI: KESIMPULAN DAN SARAN**

Merangkum pencapaian penelitian, efektivitas sistem, dan kontribusi terhadap teknologi monitoring rel. Memberikan saran pengembangan lebih lanjut, seperti peningkatan algoritma, penambahan sensor, atau penerapan skala lebih luas.