

1. Pendahuluan

Latar Belakang

Peningkatan mobilitas transportasi di Indonesia seiring pertumbuhan ekonomi dan populasi telah mendorong kebutuhan akan infrastruktur yang handal, terutama jembatan. Berdasarkan laporan Kementerian PUPR, jumlah jembatan di Indonesia meningkat dari 18.925 menjadi 19.377 antara tahun 2022 dan 2023, dengan total panjang 562.213,79 meter [1, 2]. Namun, kualitas jembatan di setiap provinsi bervariasi secara signifikan. Misalnya, Yogyakarta memiliki tingkat kelayakan jembatan sebesar 100%, sementara Sulawesi Tengah hanya 48,71% [2]. Ketimpangan ini menyoroti pentingnya pemantauan kondisi jembatan yang lebih efektif dan efisien untuk menjamin konektivitas jangka panjang.

Salah satu pendekatan untuk mengatasi tantangan tersebut adalah melalui implementasi *Structural Health Monitoring System* (SHMS), yang memungkinkan pemantauan kondisi struktur secara real-time. SHMS memanfaatkan kombinasi sensor, perangkat akuisisi data, dan algoritma analitik untuk memantau respons struktural seperti getaran, deformasi, dan tekanan [3-5].

Dalam sistem ini, teknologi *Weigh-in-Motion* (WIM) menjadi komponen sistem penting karena mampu mengukur beban kendaraan secara dinamis tanpa mengganggu arus lalu lintas. Teknologi ini memberikan data yang relevan untuk pengelolaan lalu lintas dan perencanaan pemeliharaan infrastruktur. Namun, sistem WIM konvensional yang menggunakan teknologi seperti *load cells*, sensor *piezoelectric*, dan sensor *fiber optic* [6] memiliki tantangan, termasuk biaya tinggi, sensitivitas terhadap kondisi cuaca, serta kebutuhan kalibrasi rutin [9]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa akselerometer MEMS dapat menjadi alternatif yang lebih efisien dan portabel untuk mendukung sistem WIM [10, 15-16].

Dalam rangka mengeksplor potensi implementasi WIM tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem WIM berbasis akselerometer tunggal dengan fokus pada deteksi gandar kendaraan. Sistem ini dirancang untuk menangkap getaran akibat lintasan kendaraan di atas permukaan beton, yang kemudian diproses menggunakan pipeline pengolahan sinyal digital, mengikuti metode yang dijabarkan oleh Bajwa [11]. Proses ini mencakup tahap normalisasi, filtering, dan deteksi puncak sinyal guna mendeteksi jumlah gandar kendaraan dengan lebih akurat. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada teknologi WIM konvensional yang lebih kompleks, sekaligus memberikan solusi yang lebih portabel, hemat energi, dan mudah diintegrasikan dengan SHMS yang sedang dikembangkan oleh Putra et. al. [7, 8]. Keunggulan utama solusi ini adalah potensinya untuk menyediakan alternatif yang lebih hemat biaya dan mudah diimplementasikan dibandingkan sistem WIM konvensional.

Dengan memanfaatkan data akselerometer untuk mendeteksi gandar kendaraan, sistem ini diharapkan mampu mendukung perencanaan pemeliharaan jembatan secara proaktif, mengurangi biaya perbaikan, dan memperpanjang umur infrastruktur. Selain itu, integrasi sistem ini dengan kerangka kerja SHMS di masa depan memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data untuk manajemen lalu lintas yang lebih efisien, memberikan kontribusi signifikan pada peningkatan keselamatan dan efisiensi transportasi.

Topik dan Batasannya

Topik penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem *Weigh-in-Motion* (WIM) berbasis akselerometer untuk mendeteksi as roda kendaraan secara dinamis. Teknologi WIM memiliki peran penting dalam pengelolaan lalu lintas dan pemeliharaan infrastruktur, khususnya jembatan, dengan memungkinkan pengukuran beban kendaraan tanpa mengganggu arus lalu lintas. Namun, sistem WIM konvensional yang menggunakan sensor seperti *load cells* atau *piezoelectric sensors* sering kali menghadapi tantangan dalam hal biaya, sensitivitas terhadap lingkungan, dan kebutuhan kalibrasi yang berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian ini berusaha menjawab permasalahan tersebut dengan mengusulkan sistem WIM yang lebih portabel, hemat energi, dan efisien menggunakan akselerometer MEMS.

Sistem yang dikembangkan memanfaatkan akselerometer untuk mendeteksi getaran yang dihasilkan kendaraan saat melintas di atas permukaan beton. Data getaran yang ditangkap sensor menjadi input untuk algoritma pengolahan sinyal digital yang dirancang untuk mengidentifikasi jumlah gandar kendaraan. Proses ini melibatkan beberapa tahapan, seperti normalisasi, penyaringan, dan deteksi puncak, yang dirancang untuk memastikan data yang diperoleh relevan dan akurat. Output dari sistem ini berupa informasi jumlah gandar kendaraan.

Penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu diperhatikan. Pertama, sistem diuji dalam kondisi eksperimental yang terkontrol, dengan menggunakan permukaan beton sebagai media sensor dan kendaraan tertentu sebagai subjek uji. Hal ini berarti sistem belum dievaluasi dalam kondisi lalu lintas sebenarnya yang lebih kompleks, seperti variasi jenis kendaraan, kecepatan, dan lingkungan. Kedua, penelitian ini hanya menggunakan satu akselerometer sebagai komponen utama, sehingga akurasi deteksi sangat bergantung pada posisi kendaraan terhadap area sensor. Ketiga, pengolahan sinyal masih mengandalkan algoritma konvensional yang memanfaatkan library Java Digital Signal Processing (JDSP) tanpa penerapan teknologi seperti pembelajaran mesin untuk meningkatkan ketahanan terhadap noise dan variabilitas data. Keempat, pengerjaan penelitian Tugas Akhir ini dibatasi selama kurang lebih 6 bulan sesuai dengan jangka waktu yang

diperbolehkan oleh dosen pembimbing.

Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem Weigh-in-Motion (WIM) berbasis akselerometer yang mampu mendeteksi gandar kendaraan secara dinamis dan efisien. Sistem ini dirancang untuk menangkap getaran yang dihasilkan oleh kendaraan saat melintas di atas permukaan beton, kemudian memproses data tersebut menggunakan algoritma pengolahan sinyal digital untuk menghitung jumlah as roda kendaraan. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat dicapai pemahaman lebih dalam mengenai efektivitas akselerometer dalam konteks aplikasi WIM.

Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi dan keandalan sistem dalam mendeteksi jumlah gandar kendaraan di bawah kondisi eksperimental yang terkontrol. Metrik evaluasi yang digunakan meliputi tingkat keberhasilan sistem dalam mendeteksi gandar dengan benar berdasarkan data yang dikategorikan ke dalam kondisi tertentu, seperti posisi kendaraan terhadap sensor dan variasi kecepatan kendaraan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengukur performa algoritma pengolahan sinyal, tetapi juga mengidentifikasi kondisi-kondisi optimal yang memungkinkan sistem bekerja dengan akurasi tinggi.

