

PENGUJIAN DINAMIS *IMPULS* AWAL VERTIKAL SW23 SEBAGAI PENGUKUR FREKUENSI JEMBATAN TOL

Rika Novita Wardhani¹⁾, Sulis Setiowati¹⁾, Riandini¹⁾, Budi Santoso²⁾, Nisya Fadilla²⁾, Ahmad Dzulkais Zain²⁾, Iis Ismail³⁾, Taufik Hidayat³⁾, Saffanah Putri Nadhira Mudzakir³⁾ dan Andre Yulian Atmojo⁴⁾

¹⁾Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI, Kota Depok, 16424

²⁾PT Uji Jembatan Indonesia, Summarecon, Kota Bekasi, 17142

³⁾Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI, Kota Depok, 16424

⁴⁾BRIN, Kawasan Puspiptek Gd. 240 Setu, Kota Tangerang Selatan, 15314

E-mail: rika.novitawardhani@elektro.pnj.ac.id

Abstract

The development and testing of SW23, an innovation by Simon Batapa as a frequency measuring instrument for toll bridge assessment, have been carried out. An accelerometer sensor and the ESP32 microcontroller were employed to measure bridge movement and structural conditions. The data transformation process from the time domain to the frequency domain was accomplished using the Fast Fourier Transform (FFT) method. Additionally, a Raspberry Pi 4B was utilized as a data recorder and MQTT broker. The toll bridge testing encompassed initial vertical dynamic impulse testing, initial transversal dynamic testing, initial longitudinal dynamic testing, final vertical dynamic testing, final transversal dynamic testing, and final longitudinal dynamic testing. The scope of SW23 testing specifically targeted initial vertical dynamic impulse testing. This initial vertical dynamic impulse testing was conducted using an industry-standard frequency measurement device. The test results yielded a frequency value of 1,33358 Hz for SW23 and 1,31072 Hz for the industry-standard measurement device. The testing process was overseen by the Bridge and Tunnel Road Safety Commission (KKJTJ).

Keywords: *FFT, Accelerometer, IoT, Bridge, Innovation*

Abstrak

Telah dilakukan pengembangan dan pengujian SW23 yang merupakan pengembangan Simon Batapa sebagai pengukur frekuensi jembatan tol. Sensor *accelerometer* dan mikrokontroler ESP32 digunakan untuk mengukur pergerakan dan kondisi struktur jembatan. Proses transformasi data dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan metode *Fast Fourier Transform (FFT)*. Selain itu, penggunaan *Raspberry Pi* 4B sebagai perekam data dan *broker MQTT*. Pengujian jembatan tol meliputi uji dinamis impuls awal vertikal, uji dinamis awal transversal, uji dinamis awal longitudinal, uji dinamis akhir vertikal, uji dinamis akhir transversal, uji dinamis akhir longitudinal. Batasan pengujian SW23 adalah pengujian dinamis impuls awal vertikal. Pengujian dinamis impuls awal vertikal ini didampingi dengan alat uji frekuensi berstandar industrial. Hasil pengujian diperoleh nilai 1,33358 Hz dari SW23 dan 1,31072 Hz dari alat uji berstandar industrial. Pengujian disaksikan oleh Komisi Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan (KKJTJ).

Kata Kunci: *FFT, Accelerometer, IoT, Jembatan, Inovasi*

PENDAHULUAN

Hingga Tahun 2021, data yang dikeluarkan Bina Marga tercatat 18.881 buah jembatan dengan panjang total 536.622 KM di Indonesia. Dengan banyaknya jembatan di Indonesia, dibagi ke dalam beberapa kondisi, yaitu terdapat 4.729 jembatan dalam kondisi baik, 11.232 dalam kondisi sedang, 2.566 dalam kondisi rusak ringan, 265 dalam kondisi rusak berat, dan 89 jembatan telah runtuh^[1]. Untuk memastikan pembangunan tersebut memberikan manfaat terbaik dan dapat dianggap sebagai infrastruktur yang berkualitas dengan tingkat keselamatan yang tinggi, perlunya sistem pemantauan menjadi suatu keharusan. Sistem pemantauan ini bertujuan untuk mengawasi kondisi struktur jembatan secara berkala dan mendeteksi potensi kerusakan sejak dini. Perlu dikembangkan sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) yang dikhususkan untuk pemantauan kesehatan jembatan ataupun jembatan bentang panjang^[2]. Dengan mengembangkan teknologi sensor dan sistem pemantauan, telah membuka peluang-peluang baru dalam bidang pemahaman dan pengelolaan struktur teknik. SW23 pengembangan teknologi pengukuran dari Simon Batapa, sebagai sebuah perangkat inovatif, memanfaatkan kemajuan tersebut melalui pemanfaatan sensor canggih serta kemampuan pengolahan data secara *real-time*. Hal ini merujuk pada penyediaan informasi yang akurat dan bermanfaat mengenai kesehatan struktural jembatan. Keberadaan SW23 sangat berkontribusi dalam pemenuhan persyaratan regulasi standar keamanan yang berlaku, selain juga memastikan bahwa produk lokal ini sesuai dengan standar internasional yang ditetapkan. Hal ini merupakan Salah satu solusi optimal dalam upaya mitigasi dan pencegahan kerusakan berat pada jembatan adalah melalui implementasi pemantauan berkelanjutan menggunakan Sistem Pemantauan Geseran Struktural (SHMS). Melalui pendekatan ini, aspek-aspek krusial seperti integritas struktural, pergerakan, dan kondisi keseluruhan jembatan dapat diawasi secara terus-menerus. Dengan menjalankan praktik pemantauan yang holistik, maka komponen struktural teknis jembatan mampu memiliki masa pakai yang lebih panjang dan berkelanjutan.

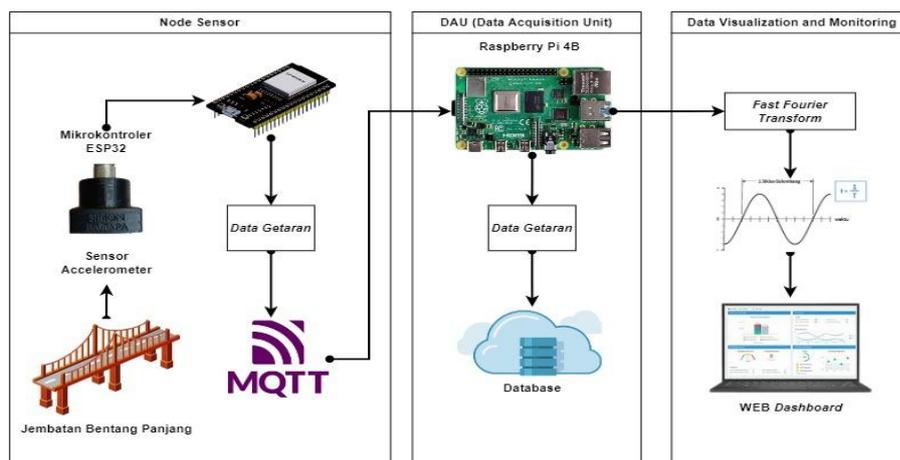
METODE PENELITIAN

Tingkat layan jembatan dapat dilihat dari beberapa parameter, yaitu lendutan, frekuensi dan tekanan beban. Jembatan dengan tingkat layan yang baik memiliki

frekuensi dibawah 1 Hz dan nilai lendutan yang tidak lebih dari $1/800$ dikali panjang bentangnya^[7]. Telah direalisasi dan diimplementasikan *Bridge Aeroelastic Monitoring System*, sistem monitoring kesehatan struktur pada Jembatan Suramadu. Konsep sistem monitoring menerapkan *wireless sensor network* yang digunakan sebagai sistem komunikasi data pada jembatan bentang panjang Surabaya-Madura untuk kemudian dapat diakses pada pusat pengawasan secara nirkabel dan sistem berjalan dengan baik^[6]. Pada tahun selanjutnya, telah direalisasikan penelitian serupa yang menerapkan teknologi *wireless sensor network* dengan parameter getaran sebagai acuan dalam menilai kondisi jembatan. Data getaran diolah menjadi frekuensi alami dengan metode *Fast Fourier Transform (FFT)*. *FFT* digunakan untuk mengubah data dalam domain waktu menjadi domain frekuensi sehingga didapatkan amplitudo dari suatu sinyal^[8].

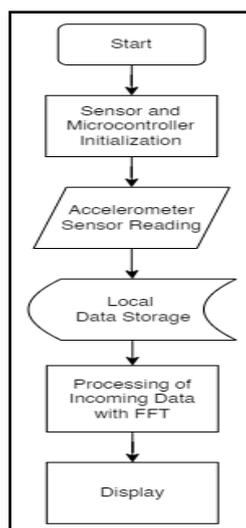
Metode dan Desain

SW23 merupakan pengembangan dari Simon Batapa yang telah melalui berbagai tahap sejak awal tahun 2020 hingga saat ini. Salah satu pendekatan fundamental yang diadopsi oleh SW23 adalah pengembangan metode *Fast Fourier Transform (FFT)*, yang digunakan untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Arsitektur SW23 dirancang secara komprehensif, dimulai dengan penerapan sensor *accelerometer* yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 melalui protokol komunikasi serial *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)*. Data yang dihasilkan oleh sensor, diakumulasikan dalam *buffer* untuk sementara waktu. Setelah *buffer* mencapai kapasitasnya, data akan dikirimkan ke perangkat perekam data (*Raspberry Pi 4B*) melalui protokol *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)*, yang bertindak sebagai perantara dalam menghubungkan ESP32 melalui protokol MQTT. Data percepatan yang diterima kemudian disimpan dalam basis data dan dianalisis dengan transformasi ke domain frekuensi menggunakan metode FFT. Dengan demikian, SW23 mampu menghasilkan informasi yang berharga mengenai karakteristik getaran dan pergerakan struktur.



Gambar 1. Diagram blok Transmitter SW23

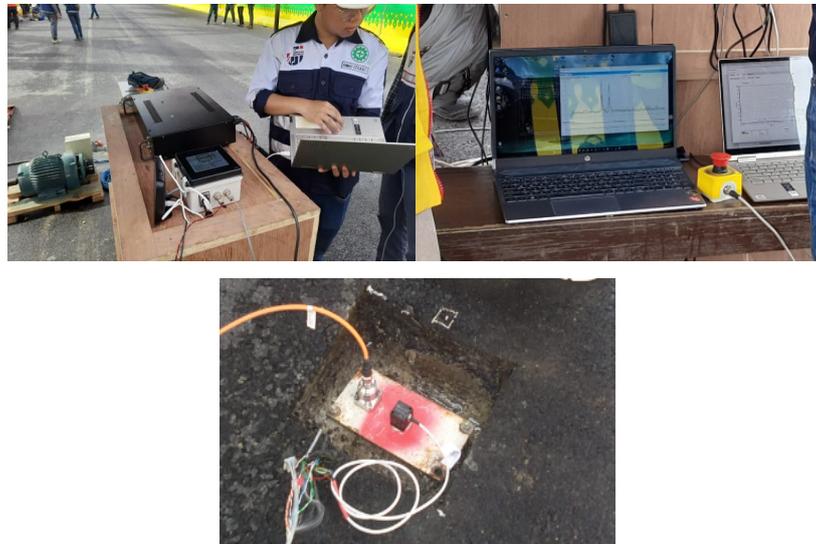
ESP32 ini terintegrasi dengan Raspberry Pi 4B melalui protokol komunikasi MQTT sebagai penyedia kinerja desktop yang memungkinkan peningkatan kecepatan prosesor, kinerja, memori, dan konektivitas bagi pengguna[9]. Penambahan Raspberry Pi adalah mengimplementasikan pemrosesan yang lebih kompleks karena keterbatasan pemrosesan yang dimiliki ESP32.



Gambar 2. Design Sistem Simon Batapa

Program yang dijalankan pada mikrokontroler ESP32 menggunakan bahasa pemrograman C++, sementara bahasa pemrograman yang diterapkan pada Raspberry Pi adalah Python. Data yang masuk ke ESP32 berbentuk numerik yang sudah dipisahkan pada masing-masing sumbu X, Y, dan Z. Data hasil *parsing* (pemisahan) akan diproses pada *loop signal processing* menggunakan algoritma *FFT (Fast Fourier Transform)*

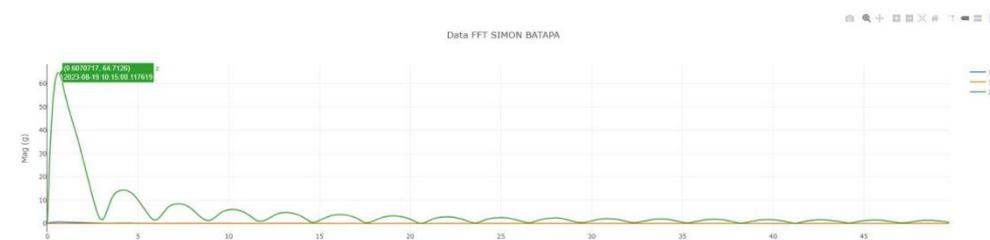
untuk mendapatkan frekuensi puncak yang paling sering muncul. Data juga diintegrasikan dua kali untuk mendapatkan displacement yang terjadi pada jembatan[11]. Hasil pengolahan data akan ditampilkan pada display monitor dan hasil data juga dapat dilihat secara global melalui layanan MQTT.



Gambar 3. Pengujian SW23 di Jembatan Tol Sei Wampu

Pengujian dilakukan pada Jembatan Sei Wampu di Kota Medan dengan tujuan untuk menguji dan membandingkan hasil dari SW23 dengan sensor industri yang telah tersedia di pasaran.

Fast Fourier Transform (FFT) adalah teknik perhitungan operasi matematika yang digunakan untuk mentransformasi sinyal analog menjadi sinyal digital berbasis frekuensi. Fast Fourier Transform (FFT) membagi sebuah sinyal menjadi frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks. Fast Fourier Transform (FFT) adalah algoritma untuk menghitung transformasi fourier diskrit dengan cepat dan efisien[10].



Gambar 4. Data Percobaan FFT

Hasil dari FFT adalah spektrum frekuensi, yang menunjukkan berapa besar getaran yang ada pada setiap frekuensi dalam sinyal. Puncak-puncak di spektrum ini akan mewakili frekuensi dominan dari getaran yang diukur. Dashboard untuk memvisualisasikan data FFT adalah dashboard dinamis yang mampu berubah dalam waktu *real-time*, tujuan dari dashboard dinamis ini adalah pengguna dapat mengklik grafik untuk melihat detail lebih lanjut, mengatur filter untuk menyaring data, atau mengubah tampilan data sesuai dengan preferensi.

https://pythontic.com/visualization/signals/fouriertransform_fft

```
[1] import numpy as np
    import matplotlib.pyplot as plt

[2] time = np.arange(0,5,1/100) # Sampling Freq 100Hz

    signalfreq = 4

[4] y1 = np.sin(2*np.pi*signalfreq*time) # sin(omega*t)

    plt.plot(time,y1)
```

Gambar 5. Preferensi FFT pada Pemrograman Python

Dalam pelaksanaannya, perangkat lunak ini memanfaatkan pustaka numpy guna melakukan perhitungan Transformasi Fourier Cepat (FFT) terhadap sinyal sinusoidal. FFT berperan mengubah representasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi, mengungkapkan komponen-komponen frekuensi yang menyusun sinyal tersebut. Melalui metode Transformasi Fourier Cepat (FFT), sinyal mampu merepresentasikan di kedua domain, yakni waktu dan frekuensi. Teknik ini digunakan secara khusus untuk mengamati spektrum frekuensi yang dihasilkan akibat dampak suatu beban tunggal pada model tertentu. Transformasi Fourier, yang menjadi dasar dari metode ini, dapat dijabarkan melalui persamaan berikut ini:

$$s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Keterangan:

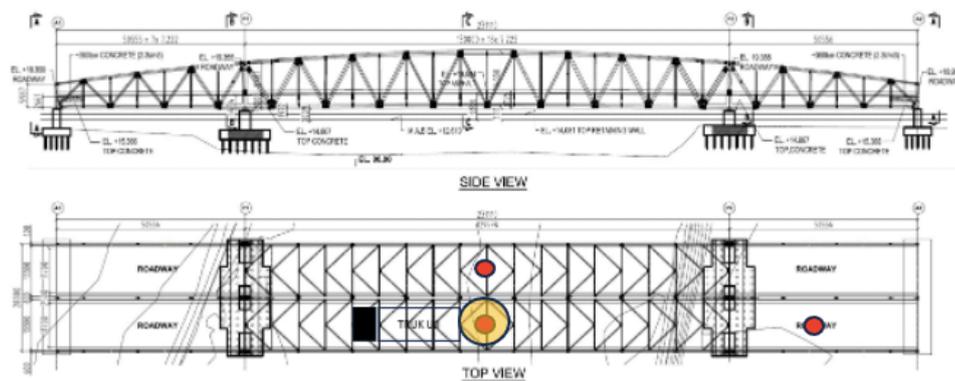
$S(f)$ = sinyal dalam domain frekuensi (frequency domain)

$s(t)$ = sinyal dalam domain waktu (time domain)

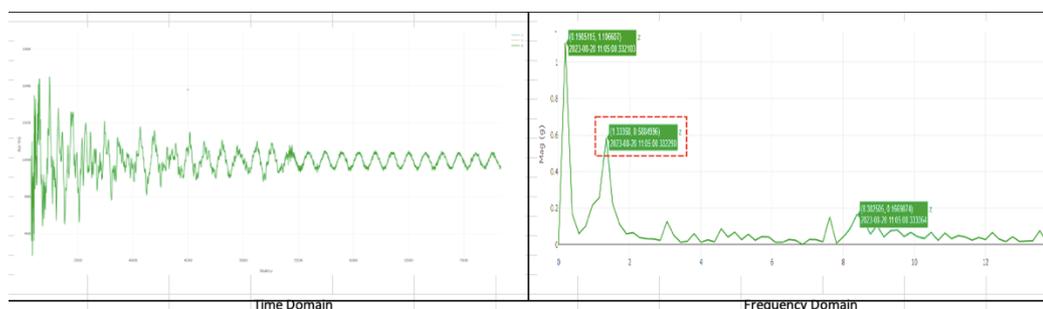
$() -j2\pi$ = konstanta nilai sebuah sinyal

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jembatan tol Sei Wampu berhasil digetarkan dengan bantuan alat yang dinamakan *exciter*. Jembatan digetarkan dan bergetar dengan *moda transversal* maupun *longitudinal*. Pengujian jembatan tol meliputi uji dinamis impuls awal vertikal, uji dinamis awal transversal, uji dinamis awal longitudinal, uji dinamis akhir vertikal, uji dinamis akhir transversal, uji dinamis akhir longitudinal. Batasan pengujian SW23 adalah pengujian dinamis impuls awal vertikal. Pengujian dinamis impuls awal vertikal SW23 ini didampingi dengan alat uji pengukur frekuensi berstandar industrial. Gambar 6 menunjukkan penempatan posisi sensor sistem pengukuran frekuensi pada 1/2L main span sisi hulu jembatan tol Sei Wampu.

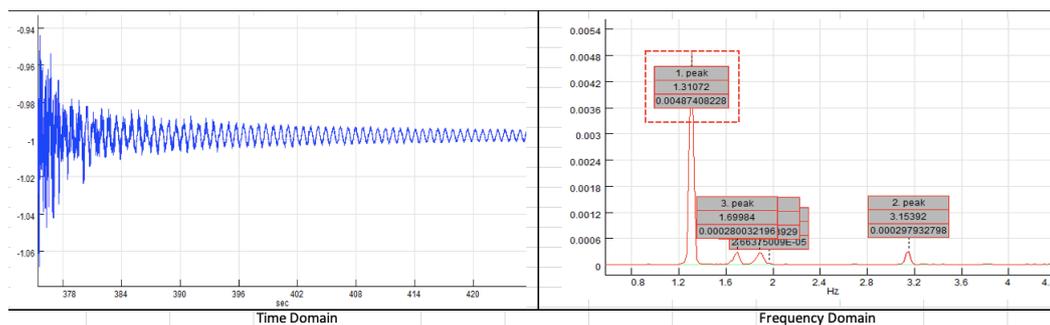


Gambar 6. Posisi *exciter* (noktah merah) dan posisi sensor (noktah kuning) 1/2L main span sisi hulu pada pengujian dinamis *impuls* awal vertikal SW23 terhadap alat uji frekuensi berstandar industrial sebagai pengukur frekuensi jembatan tol



Gambar 7. Performansi hasil pengujian SW23 dalam *time domain* dan *frequency domain* 1/2L main span sisi hulu pada pengujian dinamis *impuls* awal vertikal

Pengujian SW23 dengan dinamis impuls vertikal pada jembatan tol pada 1/2L main span sisi hulu menghasilkan frekuensi sebesar 1,33358 Hz.



Gambar 8. Performansi hasil pengujian alat ukur standar industrial dalam *time domain* dan *frequency domain* 1/2L main span sisi hulu pada pengujian dinamis impuls awal vertikal

Pengujian alat ukur standar industrial dengan dinamis impuls vertikal pada jembatan tol pada 1/2L *main span* sisi hulu menghasilkan frekuensi sebesar 1,31072 Hz.

Tabel 1.

Analisis Perhitungan Hasil Uji Perbandingan Performansi SW23 terhadap terhadap Alat Uji Frekuensi berstandar Industrial Tipe Pengujian Dinamis Impuls Awal Vertikal

Pengujian Dinamis Impuls Awal Vertikal	ALAT A (X1)	ALAT B (X2)	(X1-X2)	(X1-X2) ²
Posisi Sensor 1/2L Main span Sisi hulu	1,33358	1,31072	0,02286	0,0005226

Tampak pada tabel 1 dilaksanakan analisis perhitungan tingkat kesalahan. Analisis perhitungan hasil uji perbandingan performansi SW23 terhadap alat uji frekuensi berstandar industrial dengan tipe pengujian dinamis impuls awal vertikal menghasilkan error kesalahan sebesar 0,0005226.

SIMPULAN

Hasil uji perbandingan performansi SW23 terhadap alat uji frekuensi berstandar industrial dengan tipe pengujian dinamis impuls awal vertikal menghasilkan frekuensi 1,33358 Hz dan 1,31072 Hz dengan error kesalahan sebesar 0,0005226. Pengujian dilaksanakan di jembatan tol lintas Sumatera yaitu Jembatan Tol Sei Wampu yang disaksikan oleh Komisi Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan (KKJTJ).

DAFTAR PUSTAKA

[1] PUPR, "Jumlah Jembatan Nasional," Ditjen Bina Marga, 2021.

- [2] Atmojo, A. Y., Anwar, K., Andika, M. G., & Wardhani, R. N. (2017). Aeroelastic Monitoring System a Part of Long-span Bridge Structural Health Monitoring System. *IEEE* , 1-6.
- [3] Fuzzy-Neuro System for Bridge Health Monitoring. (n.d.).
- [4] Jose, M. L., Dagle, C., Silva, P., & Pottinge, H. (2003). Fuzzy-Neuro System for Bridge Health Monitoring. *IEEE* , 8-13.
- [5] Latief, R. U., Abdurrahman, M. A., & Setiawan, R. (n.d.). *Penilaian Risiko Dengan Metode Fuzzy Pada Proyek Pembangunan Jembatan Tello Fuzzy Risk Assessment In Tello Bridge Construction Project*.
- [6] Rika Novita Wardhani. (n.d.). *Dokumen Uji Kelayakan Teknik Dan Ekonomis Simon Batapa*.
- [7] Septinuriandini, S. R. I. ST. ,MT. (2015). *pedoman-perencanaan-sistem-monitoring-kesehatan-struktur-jembatan*. 1–23.
- [8] Putra, S. A., Agus, G., Sani, A., Nurwijaya, A. T., Anandadiga, A., Wijayanto, P. B., Trilaksono, B. R., & Riyansyah, M. (2018). Sekolah Teknik Elektro dan Informatika. In *Jalan Ganesha* (Vol. 7, Issue 3).