

PEMANTAUAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN

MONITORING SUPERSTRUCTURES OF THE BRIDGE

Faiz Naufal Wardhana¹, Sony Sumaryo², Agung Surya Wibowo³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹faiznawar@gmail.com ²sonysumaryo@telkomuniversity.ac.id ³agungsw@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur vital pada sistem transportasi yang diharapkan memiliki usia layan yang panjang. Kondisi struktur jembatan perlu dilakukan pemantauan untuk menentukan jadwal pemeliharaannya. Defleksi camber melebihi batas rencana sangat membahayakan pengguna jembatan, selain itu frekuensi alami juga dapat mempengaruhi kemampuan layan struktur.

Sistem pemantauan dikembangkan untuk dapat mengetahui kondisi struktur jembatan secara *real time* agar dapat mengantisipasi kegagalan struktur. Pada Tugas Akhir ini parameter yang dipantau adalah lendutan dan frekuensi alami struktur.

Hasil dari tugas akhir ini adalah sistem yang memiliki akurasi kemampuan sensor sebesar 95,889% dan didapat pergeseran maksimum sebesar 0,1 cm dengan defleksi 2,012 cm. Sementara frekuensi alami pada ketiga sumbu yang terjadi pada saat *prototype* diberi beban berjalan 150 Kg sebesar X=2,330; 1,523 Hz. Y=3,445; 0,469 Hz. Z=6,921; 1,406 Hz, sementara saat diberi beban berjalan 230 Kg sebesar X=63,054; 0,352 Hz. Y=37,112; 0,352 Hz. Z=10,343; 1,289 Hz.

Kata Kunci: Jembatan, lendutan, frekuensi alami, *Fast Fourier Transform* (FFT)

Abstract

Bridges are one of the vital infrastructure in the transportation system which is expected to have a long service life. The condition of the bridge structure needs to be monitored to determine its maintenance schedule. Camber deflection over the plan limit is very dangerous for bridge users, besides that natural frequency can also affect the ability of service structures.

The monitoring system was developed to be able to determine the condition of the bridge structure in real time in order to anticipate structural failure. In this Final Project, the monitored parameters are deflection and natural frequency of the structure.

The result of this final project is a system that has the accuracy of sensor capability of 95.889% and obtained a maximum shift of 0.1 cm with a deflection of 2.012 cm While the natural frequency in the three axes that occurred when the prototype was given a moving load of 150 Kg at X = 2.330; 1.523 Hz. Y = 3.445; 0.469 Hz. Z = 6.921; 1.406 Hz, while when given a moving load 230 Kg of X = 63.054; 0.352 Hz. Y = 37.112; 0.352 Hz. Z = 10.343; 1.289 Hz.

Key Words: Bridge, deflection, natural frequency, *Fast Fourier Transform* (FFT)

1. Pendahuluan

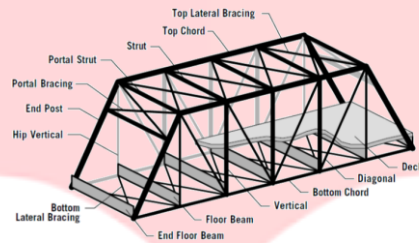
Jembatan merupakan infrastruktur vital yang diharapkan memiliki usia layan yang panjang. Kondisi struktur sangat mempengaruhi kemampuan layan jembatan. Pemantauan terhadap kondisi struktur sangat diperlukan untuk menjaga kekokohan struktur jembatan. Beberapa parameter yang perlu dipantau kondisinya ada besaran defleksi camber dan vibrasi yang terjadi pada struktur. Contoh kegagalan struktur adalah runtuhnya jembatan Cipunagara di Subang pada tahun 2004 yang diakibatkan karena jembatan kelebihan beban atau *overload*^[4]

Pada Tugas Akhir ini akan dibuat alat yang mampu mendeteksi defleksi camber dan vibrasi yang dibaca setiap satuan detik. Pergeseran bearing pada jembatan akan merepresentasikan defleksi yang terjadi. Sementara itu untuk mendeteksi frekuensi alami, dilakukan transformasi dari besaran percepatan domain waktu ke domain frekuensi menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT). Semua pengukuran ini akan dilakukan pada purwarupa jembatan.

2. Dasar Teori

2.1 Jembatan Warren Truss^[5]

Jembatan warren truss terdiri dari dua rangka utama berbentuk segitiga sama kaki atau sama sisi yang diikat bersama dengan balok-balok melintang dan pengaku lateral. Sebagian rangka diagonal jembatan jenis ini mengalami gaya tekan (compression) dan sebagian lainnya mengalami gaya tarik (tension).



Gambar II- 1 Jembatan warren truss^[2]

Kelebihan dari jembatan jenis ini adalah kemampuan untuk menyebar beban yang dialami jembatan secara merata pada setiap struktur jembatan pada saat struktur jembatan mengalami beban membentang (beban terdistribusi). Struktur truss akan mengalami gaya yang terkonsentrasi di bawah titik beban. Namun pada skenario beban terkonsentrasi, strukturnya tidak sebaik pada mendistribusikan beban secara merata ke seluruh bagian struktur. Oleh karena itu, jenis warren truss lebih baik digunakan untuk beban membentang, namun tidak sesuai untuk digunakan dimana beban terkonsentrasi pada satu titik atau satu node.

2.2 Camber (Lawan Lendut)^[6]

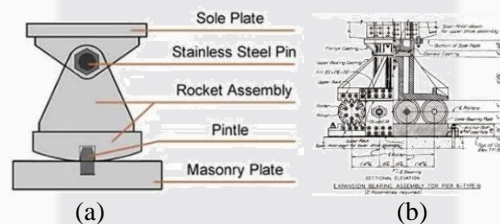
Dalam jembatan camber merupakan struktur lengkung yang digunakan untuk melawan efek dari gaya beban. Beban yang dimaksud adalah beban mati yaitu beban yang diakibatkan oleh lantai kendaraan dan beban hidup rencana yaitu beban kendaraan atau sesuatu yang melintas di atas lantai kendaraan^[7]. Camber jembatan dirancang dengan kondisi camber Y-positif sehingga saat jembatan mengalami tekanan oleh beban hidup, kondisi permukaan rangka jembatan tetap datar. Oleh karena itu, terdapat batas izin defleksi level camber yang diperbolehkan berdasarkan surat edaran Direktorat Jendral Bina Marga bulan Januari tahun 2009 mengenai teknis desain struktur rangka baja.

Tabel II- 1 Petunjuk Teknis Desain Struktur Rangka Baja di Lingkungan Direktorat Jendral Bina Marga^[2]

No.	Uraian	Syarat
1	Lendutan maksimum untuk balok diatas dua tumpuan atau gelagar menerus	1/800 x bentang
2	Lendutan maksimum untuk sebagian jalur digunakan pejalan kaki	1/1000 x bentang
3	Lendutan maksimum akibat beban mati	1/300 x bentang
4	Lendutan maksimum untuk beban hidup pada struktur cantilever	1/300 x bentang

2.3 Bearing Jembatan^[3]

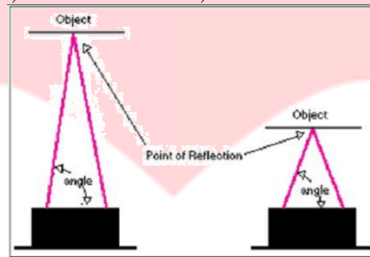
Bearing merupakan tumpuan pada konstruksi jembatan yang berfungsi meredam dan mengakomodasi pergerakan konstruksi pada bagian atas jembatan yang diakibatkan oleh gaya-gaya yang bekerja pada jembatan seperti beban mati (*dead load*), beban hidup (*live load*), beban angin, gaya rem, dll. Dengan diimplementasikannya sistem *bearing* ini, maka konstruksi struktur atas jembatan memungkinkan untuk dapat bergerak sekaligus meredam gaya-gaya yang membahayakan struktur sehingga pengguna jembatan aman menggunakan jembatan.



Gambar II- 2 a.) Tumpuan sendi^[3] b.) Tumpuan roll^[3]

2.4 Sensor Infrared^[7]

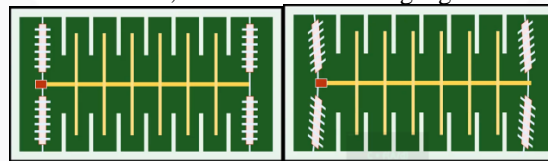
Sistem sensor *infrared* pada dasarnya menggunakan sinar *infrared* sebagai media untuk mengestimasi jarak sensor terhadap objek. Sinar *infrared* tidak terganggu oleh cahaya tampak dari lingkungan karena memiliki daerah spektrum yang berbeda. Untuk mengestimasi jarak objek, sensor ini menggunakan metode *triangulation* dan sebuah linear CCD array sebagai *position-sensitive detector*. Sinyal *infrared* yang telah dimodulasi dipancarkan oleh emitter dan akan dipantulkan oleh objek yang diamati. Apabila tidak ada objek, maka *infrared* tidak akan dipantulkan kembali dan sensor tidak mendeteksi keberadaan objek. Apabila terdapat objek, pantulan *infrared* akan diterima oleh lensa pada detektor yang difokuskan ke linear CCD array. Detektor akan mendeteksi sudut datang dari pantulan *infrared* kemudian akan diproyeksikan oleh lensa pada CCD array sesuai sudut datang dari *infrared* yang diinterpretasikan sebagai parameter jarak. Keuntungan atau manfaat dari sistem ini dalam penerapannya antara lain sebagai pengendali jarak jauh, alarm keamanan, atau otomatisasi sistem.



Gambar II- 3 Ilustrasi cara kerja sensor infrared^[7]

2.5 Akselerometer^[1]

Akselerometer digunakan untuk mengukur percepatan statis dan dinamik, yaitu pengukuran gaya konstan terhadap gravitasi bumi dan pengukuran terhadap objek bergerak. Prinsip kerja transduser ini bekerja berdasarkan hukum fisika bahwa apabila suatu konduktor digerakkan melalui suatu medan magnet, atau apabila suatu medan magnet digerakkan melalui sebuah konduktor, maka akan timbul tegangan induksi pada konduktor.



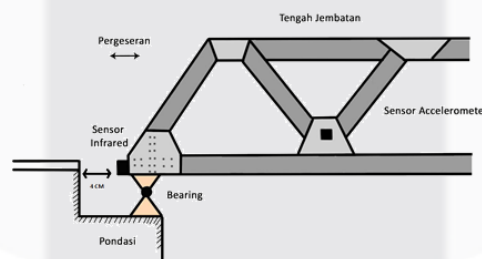
Gambar II- 4 Cara kerja sensor akselerometer

Sensor akselerometer menggunakan MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) yang mengandung komponen mekanik dan elektronik yang dibangun dalam skala mikrometer yang terintegrasi pada IC (*Integrated Circuit*). Didalam IC MEMS ini terdapat kontak pegas (warna merah pada gambar II- 7) yang terhubung dengan massa beban yang juga terhubung dengan bagian konduktif yang dapat bergerak (warna kuning pada gambar II- 7). Pada bagian luarnya terdapat lempeng konduktif yang tetap (warna abu-abu pada gambar II- 7). Pada saat terjadi perubahan posisi, sistem bergerak karena terjadi akselerasi. Lempeng konduktif bagian dalam bergerak karena adanya perpindahan. Ketika sistem bergerak nilai kapasitor berubah, dengan mengukur perubahan kapasitansi didapatkan akselerasi yang bekerja pada sistem. Untuk mengukur 3 sumbu percepatan, maka dibutuhkan 3 MEMS sehingga mampu membaca percepatan dalam arah yang berbeda. Pada kondisi diletakkan pada suatu bidang datar, akselerometer akan mendeteksi percepatan $+1g$ (nilai gravitasi bumi) pada sumbu vertikalnya, untuk percepatan pada sumbu horizontalnya, maka akselerometer akan langsung mengukur percepatan secara langsung ketika bergerak pada sumbu horizontal.

3. Perancangan Sistem

3.1 Desain Perangkat Keras

Desain sistem secara keseluruhan akan dijelaskan pada gambar dibawah ini:



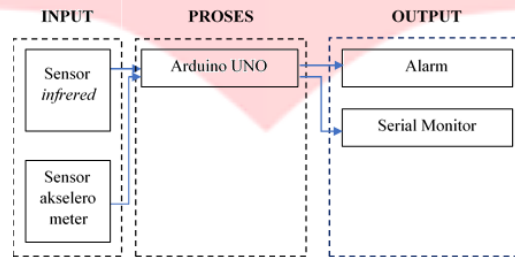
Gambar III- 1 Peletakan sensor

Sistem sensor terdiri dari sensor *infrared* yang dipasang pada bagian yang dapat bergerak pada jembatan. Posisi sensor diletakan pada pangkal jembatan menghadap ke fondasi jembatan. Jarak antara sensor ke fondasi diatur sejauh 4 cm. Peletakan didasari data perancangan jembatan yang sesuai SNI bahwa batas maksimum defleksi *camber* pada setengah bentang sebesar 4 mm. Nilai pergeseran pada pangkal jembatan akan dikonversi menjadi nilai defleksi pada setengah bentang dengan ketentuan statika baja.

Sementara untuk pemantauan vibrasi jembatan dilakukan menggunakan sensor akselerometer. Pada kasus ini objek yang diamati ada beban berjalan yang melintasi purwarupa jembatan yang disesuaikan dengan kebutuhan pengujian. Data yang terbaca oleh sensor akselerometer akan diolah mikrokontroler menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) agar didapat nilai frekuensi yang mempunyai amplitudo terbesar.

3.2 Diagram Blok Sistem

Penjelasan mengenai diagram blok utama yang akan dijalankan pada proses pemantauan struktur atas jembatan adalah sebagai berikut:

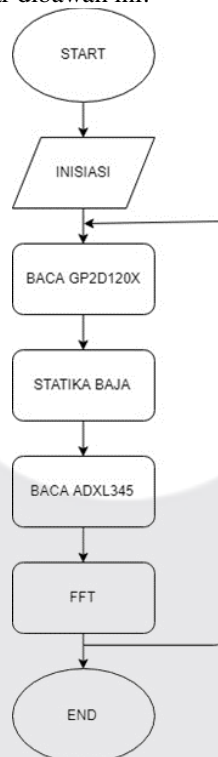


Gambar III- 2 Diagram Blok Sistem

Pada gambar 3.2 sensor mendeteksi parameter-parameter yang diukur kemudian nilai bacaan sensor akan diproses pada mikrikontroler sehingga mendapatkan nilai yang diinginkan. Nilai hasil proses dari mikrokontroler akan dibandingkan dengan data perencanaan untuk mengetahui kondisi struktur.

3.3 Diagram Alir Perangkat Lunak

Penjelasan mengenai urutan perintah yang akan dieksekusi pada sistem pendulum secara keseluruhan pada proses *swing-up* akan dijelaskan pada gambar dibawah ini:



Gambar III- 3 Diagram Alir Sistem

Gambar III-6 Merupakan *flowchart* yang menunjukkan kerja sistem perangkat dalam mendeteksi kegagalan struktur jembatan. Sistem yang dibuat adalah pembacaan defleksi *camber* yang mengindikasikan kegagalan struktur jembatan. Prinsip kerjanya adalah sensor *infrared* akan membaca pergeseran posisi *bearing* yang dapat

bergeser menyesuaikan besar gaya yang dialami jembatan. Nilai pergeseran tersebut akan dikonversi oleh Arduino UNO kedalam besaran defleksi *camber* dalam satuan milimeter.

Selain membaca defleksi *camber*, sistem pemantauan struktur ini juga membaca besarnya vibrasi yang terjadi terhadap jembatan. Nilai percepatan yang didapat dari pembacaan sensor akselerometer akan diolah menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengonversi nilai pada domain waktu ke domain frekuensi. Setelah proses konversi selesai, akan didapatkan frekuensi yang memiliki amplitudo terbesar yang terjadi terhadap purwarupa jembatan.

4. Hasil Pengujian

4.1. Pengujian Akurasi Sensor GP2D120X

Pengujian dilakukan dengan meletakkan sensor *infrared* GP2D120X pada struktur jembatan yang dapat bergerak menghadap ke bagian jembatan yang solid dan berkedudukan tetap. Pengukuran dilakukan dengan menggeser posisi sensor secara horizontal sejajar dengan posisi penggaris. Pengujian dilakukan dari posisi 4 cm sampai 5 cm dengan digeser persatuan milimeter. Nilai yang didapat dari sensor akan dibandingkan dengan nilai referensi berupa penggaris.

Tabel 4.1 Pengujian akurasi sensor GP2D120X

No.	Penggaris (cm)	Sensor (cm)	Error (cm)	%Error
1	4,0	3,996	0,004	0,100
2	4,1	4,003	0,097	2,366
3	4,2	4,204	0,004	0,087
4	4,3	4,265	0,035	0,806
5	4,4	4,370	0,030	0,674
6	4,5	4,616	0,116	2,578
7	4,6	4,789	0,189	4,101
8	4,7	4,690	0,010	0,213
9	4,8	4,858	0,058	1,215
10	4,9	5,004	0,104	2,122
11	5,0	5,175	0,175	3,507
Error Maksimal				0,189
Rata-Rata Error				1,615
Standar Deviasi				0,401
Varian				0,161

Berdasarkan tabel IV-1 dari sebelas titik yang diuji sebanyak 30 kali didapatkan persentase *error* sebesar 1,615% dengan persentase *error* maksimal sebesar 4,101%. Sehingga didapat tingkat akurasi sebesar 95,899%. Adapun tingkat kepresisian sensor cukup baik karena semakin kecil nilai standar deviasi dan varian maka makin baik tingkat kepresisiannya.

4.2 Pengujian Akurasi Pembacaan Pergeseran Tumpuan

Pengujian dilakukan dengan meletakkan sensor pada pangkal *prototype* jembatan yang terdapat sendi roll didasarnya. Sensor diletakkan menghadap ke arah fondasi yang diasumsikan sebagai papan. Jarak antara sensor dengan papan diatur sejauh 4 cm. Setelah itu *prototype* jembatan akan diberikan variasi beban terpusat pada setengah bentang *prototype*. Kemudian akan diamati perubahan jarak antara sensor dengan papan sehingga dapat diketahui jarak antara gelagar *prototype* ke fondasi. Nilai pergeseran diamati untuk melihat pengaruh pergeseran terhadap defleksi.

Tabel 4.2 Hasil uji sensor terhadap pergeseran sendi

Beban (Kg)	Posisi Sendi (cm)	Displacement Sensor (cm)	Defleksi Potensial (cm)
13,25	4,17	0,00	0
26,5	4,18	-0,01	0
39,75	4,17	0,00	0
53	4,17	0,00	0
63	4,17	0,00	0
73	4,17	0,00	0
83	4,17	0,00	-0,0037
93	4,17	0,00	0
103	4,17	0,00	0
113	4,15	0,02	-0,0012
123	4,15	0,02	-0,0012
133	4,15	0,02	-0,0012
143	4,15	0,02	0
153	4,14	0,03	0
163	4,14	0,03	0
173	4,15	0,02	0
183	4,15	0,02	-0,00121
193	4,15	0,02	0
203	4,15	0,02	-0,00012
211	4,13	0,04	-0,00155

211	4,13	0,04	-0,00155
219	4,13	0,04	-0,00056
227	4,10	0,07	-0,00023
235	4,11	0,06	-0,00036
243	4,11	0,06	-0,00087
251	4,11	0,06	-0,00137
259	4,11	0,06	-0,00164
267	4,10	0,07	-0,00167
275	4,11	0,06	-0,00145
283	4,11	0,06	-0,00096
291	4,11	0,06	-0,00079
299	4,11	0,06	-0,00075
307	4,11	0,06	-0,00075
315	4,11	0,06	-0,00074
323	4,11	0,06	-0,00246
331	4,11	0,06	-0,00213
339	4,11	0,06	-0,00517
347	4,10	0,07	-0,00302
355	4,11	0,06	-0,00125
363	4,10	0,07	-0,00072
371	4,11	0,06	-0,00073
379	4,10	0,07	-0,00073
387	4,10	0,07	-0,01757
395	4,07	0,10	-2,012
403	4,08	0,09	-0,00075

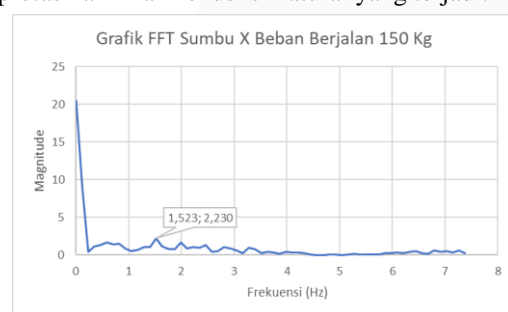
Berdasarkan tabel diatas diketahui saat prototype diberi variasi beban bertingkat hingga beban maksimum. Terjadi pergeseran sendi maksimum sejauh 0,1 cm dan defleksi maksimum sebesar 2,012 cm. Dapat diketahui saat defleksi maksimum, pergeseran yang dialami sendi juga pada titik maksimum. Setelah itu struktur akan kembali ke posisi awal karena sudah melewati batas plastisnya. Arah pergeseran posisi sendi ini sejajar panjang jembatan untuk mengakomodasi perubahan struktur akibat beban yang terjadi.

4.3 Pengujian Pengolahan Sensor ADXL345

Pengujian dilakukan dengan meletakkan sensor ADXL345 pada bagian bawah rangka pada setengah bentang panjang purwarupa jembatan. Kemudian purwarupa jembatan diberi variasi beban berjalan seberat 150 kg dan 230 kg. Hasil percepatan setiap axis yang dibaca oleh sensor ADXL345 akan diolah menggunakan algoritma FFT sehingga didapat nilai pada domain frekuensinya dan dapat diketahui frekuensi dengan simpangan amplitudo terbesar pada setiap axisnya. Nilai frekuensi ini menginterpretasikan nilai frekuensi natural yang terjadi.

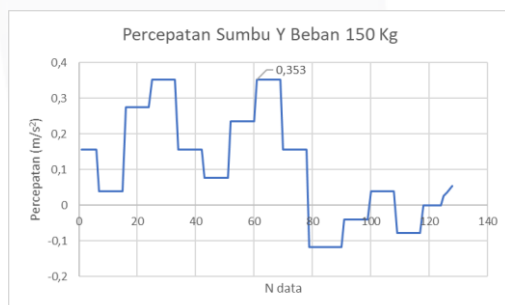


(a)

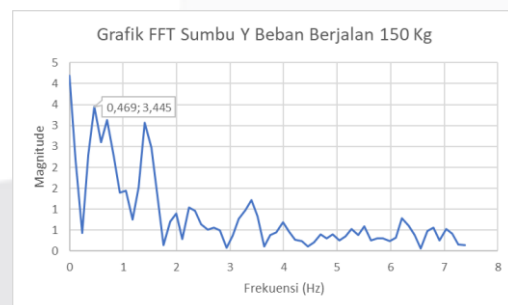


(b)

Gambar 4.1 (a) Pengujian percepatan sb.X (b) Pengujian FFT sb. X

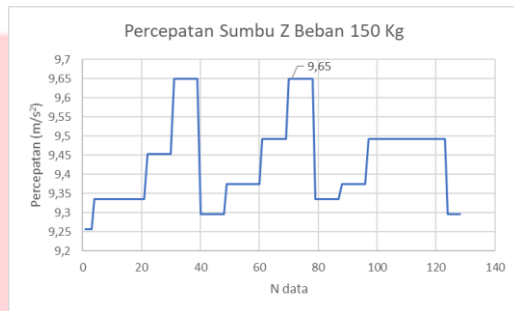


(a)

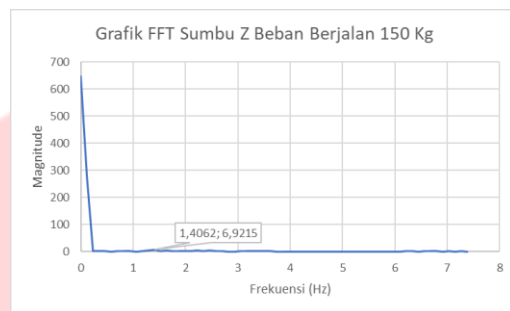


(b)

Gambar 4.2 (a) Pengujian percepatan sb.Y (b) Pengujian FFT sb. X



(a)

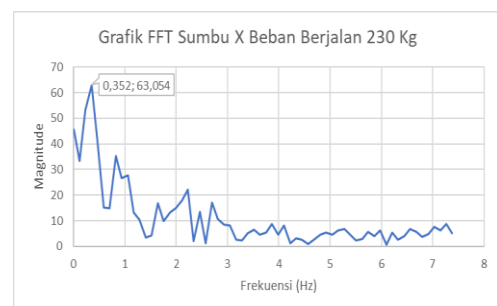


(b)

Gambar 4.3 (a) Pengujian percepatan sb. Z (b) Pengujian FFT sb. Z

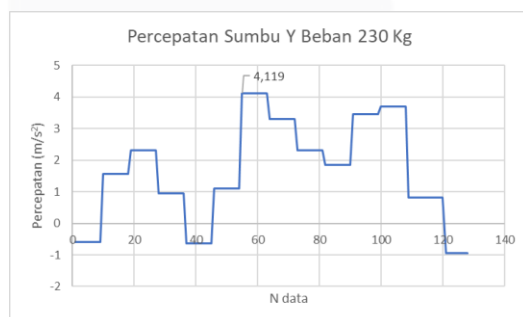


(a)

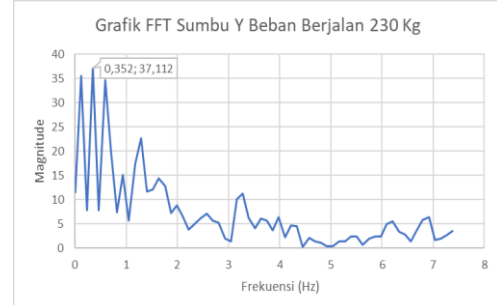


(b)

Gambar 4.4 (a) Pengujian percepatan sb. X (b) Pengujian FFT sb. X



(a)

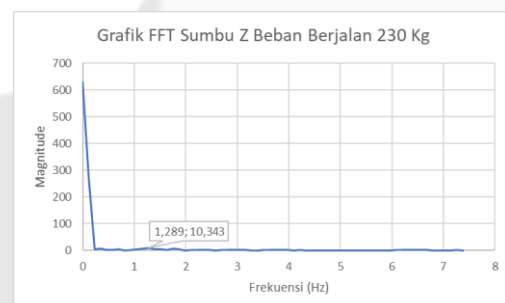


(b)

Gambar 4.5 (a) Pengujian percepatan sb. Y (b) Pengujian FFT sb. Y



(a)



(b)

Gambar 4.6 (a) Pengujian percepatan sb. Z (b) Pengujian FFT sb. Z

Tabel IV- 2 Perbandingan nilai tiap axis dengan variasi beban

BEBAN		150 Kg	230 Kg
PERCEPATAN MAKSIMAL (G)	X	0,549	3,727
	Y	0,353	4,119
	Z	9,650	9,767
FREKUENSI DASAR (Hz)	X	1,523	0,352
	Y	0,469	0,352
	Z	1,406	1,289
AMPLITUDO TERTINGGI	X	2,230	63,054
	Y	3,445	37,112
	Z	6,921	10,343

Berdasarkan tabel IV-2 diketahui percepatan maksimal, frekuensi dasar dan amplitudo tertinggi pada setiap axisnya. Semua nilai tiap axis berbeda-beda tergantung pada beban yang melintas. Semakin berat beban yang melintas maka percepatan dan amplitudo frekuensi yang terjadi pada purwarupa semakin besar, sementara frekuensi alami yang terjadi semakin kecil, hal ini berarti periode getar yang terjadi semakin pendek.

5. Kesimpulan

1. Didapat akurasi dari pembacaan sensor *infrared* GP2D120X untuk pergeseran horizontal sebesar 95,899%.
2. Didapat pergeseran maksimum sendi yang terjadi sebesar 0,1 cm pada saat beban 395 Kg dengan defleksi sebesar 2,012 cm.
3. Hasil pembacaan defleksi struktur kurang akurat karena keterbatasan kemampuan sensor yang tingkat resolusinya satu milimeter.
4. Pada pemantauan getaran beban 150 Kg, nilai masing-masing amplitudo terbesar dengan frekuensi dasarnya adalah X=2,330; 1,523 Hz. Y=3,445; 0,469 Hz. Z=6,921; 1,406 Hz.
5. Pada pemantauan getaran beban 230 Kg, nilai masing-masing amplitudo terbesar dengan frekuensi dasarnya adalah X=63,054; 0,352 Hz. Y=37,112; 0,352 Hz. Z=10,343; 1,289 Hz.
6. Semakin besar beban yang melintasi *prototype*, semakin besar pula amplitudo dan percepatan yang terjadi pada *prototype*.
7. Semakin besar beban yang melintasi *prototype*, semakin kecil frekuensi natural dan semakin lama pula periode getaran pada *prototype*.

Daftar Pustaka

- [1] Adistya, Irman Supriadi. "Pemngembangan Sistem Monitoring Vibrasi Pada Kipas Angin Menggunakan Accelerometer ADXL345 Dengan Metode FFT Berbasis Labview"
- [2] Badan Standarisasi Nasional. "Rancangan Standar Nasional Indonesia, Perencanaan Struktur Baja Untuk Jembatan," 2005.
- [3] "Bridge Bearings – Types of Bearings for Bridge Structures and Details" [Online]. Available: <https://theconstructor.org/structures/bridge-bearings-types-details/18062/>
- [4] Kulicki, J.M. "Highway Truss Bridges." Bridge Engineering Handbook. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan Boca Raton: CRC Press, 2000
- [5] Kumalasari, Annisa Dian. "Perancangan Sensor Pergeseran Menggunakan Serat Optik Untuk Struktur Rangka Jembatan," STT Telkom, 2011.
- [6] "Sensor Inframerah" [Online]. Available: <https://rayendente.wordpress.com/2015/03/26/sensor-inframerah>
- [7] "Jembatan Cipunagara Ambruk Diduga Karena Kelebihan Beban" [Online]. Available: <http://news.liputan6.com/read/82605/jembatan-cipunagara-ambruk-diduga-karena-kelebihan-beban>