

MONITORING KONDISI STRUKTUR JEMBATAN RANGKA BAJA TERHADAP BEBAN DINAMIS AKTUAL KENDARAAN (Studi Kasus: Jembatan Tlatar)

Eka Faisal Nurhidayatullah¹, Lutfi Mirsa Firdaus², Cahyo Dita Saputro³

^{1,2,3}Universitas Teknologi Yogyakarta

Email: eka.faisal@staff.uty.ac.id

Abstrak

Peristiwa keruntuhan jembatan sudah berulang kali terjadi di Indonesia. Monitoring kondisi struktur jembatan eksisting perlu dilakukan guna menjamin bahwa infrastruktur yang sudah dibangun tetap berada dalam kondisi prima meskipun dengan umur layan yang sudah tidak lagi muda. Apabila terdapat indikasi adanya kelemahan struktur dapat segera diantisipasi dengan melakukan rehabilitasi atau perkuatan struktur bangunan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi struktur jembatan eksisting berdasarkan parameter frekuensi, gaya dalam, kapasitas *frame* struktur, lendutan serta rekomendasi perlakuan yang sesuai. Penelitian dilaksanakan menggunakan dua simulasi kondisi beban lalu lintas yaitu beban aktual dan rencana kendaraan. Beban aktual kendaraan diperoleh dari rekaman sensor *accelerometer arduino gyroscope* MPU6050 yang dipasang pada elemen struktur jembatan eksisting sedangkan beban rencana diperhitungkan sesuai dengan ketentuan SNI 1725: 2016. Kedua beban tersebut dikombinasikan dengan gaya gempa statik ekuivalen sesuai dengan ketentuan SNI 2833: 2016 dan Peta Gempa 2017. Analisis struktur dikerjakan dengan metode analisis dinamik linear. Berdasarkan analisis diketahui nilai frekuensi aktual jembatan sebesar 2,083 Hz lebih kecil dibandingkan frekuensi alami sebesar 2,215 Hz dengan rasio frekuensi sebesar 5,923%. Gaya dalam akibat beban aktual kendaraan baik pada elemen struktur rangka batang maupun gelagar belum mencapai keadaan ultimate. Pemeriksaan kapasitas struktur jembatan baik pada elemen struktur rangka batang maupun gelagar menghasilkan rasio < 1 sehingga tidak terindikasi mengalami kerusakan lokal. Lendutan akibat beban aktual kendaraan menunjukkan nilai yang lebih kecil dari beban rencana dan batas izin. Hasil analisis parameter frekuensi, gaya dalam, kapasitas struktur, dan lendutan menunjukkan bahwa struktur jembatan eksisting termasuk berada dalam kondisi baik. Meskipun demikian, jembatan tetap memerlukan perawatan preventif untuk mencegah terjadinya kerusakan serta menjaga kinerja struktur.

Kata kunci: Monitoring struktur jembatan, beban aktual kendaraan, frekuensi aktual, kapasitas struktur, lendutan.

1. PENDAHULUAN

Jembatan merupakan sarana transportasi penting sebagai penghubung suatu daerah dengan daerah yang lain (Supriyadi dan Muntohar, 2007). Jembatan berperan menghubungkan daerah yang terpisah baik oleh jalan raya, sungai, danau, waduk, rawa, maupun lembah. Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki ribuan sungai dengan jumlah sedikitnya 70.607 sungai, meliputi sungai utama sebanyak 5.590 dan anak sungai sebanyak 65.017 (Badan Pusat Statistik (BPS), 2023). Berdasarkan data yang dirilis oleh Kementerian PUPR tahun 2022 (Kementerian PUPR, 2024) diketahui bahwa saat ini Indonesia memiliki hampir 19 ribu unit jembatan pada ruas jalan nasional dengan 48 diantaranya merupakan jembatan khusus. Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta mempunyai jumlah jembatan yang cukup banyak dengan proporsi kisaran 7% sejumlah 1291 unit. Sebagian besar komposisi jembatan merupakan infrastruktur yang sudah cukup lama dibangun yaitu pada masa orde baru program repelita I

hingga V bahkan masih terdapat jembatan di era orde lama atau jaman kolonial masih berdiri. Mirisnya apabila kita melihat sebaran kondisi jembatan di Jawa Tengah dan Yogyakarta diketahui bahwa jembatan dengan kondisi rusak ringan sebesar 25,39%, rusak sedang 58,44% sedangkan kondisi baik yang hanya berkisar 5% nan saja.

Peristiwa keruntuhan jembatan sudah berulang kali terjadi di Indonesia. Menurut data publikasi PUPR Tahun 2024, tercatat sebanyak 122 jembatan pernah mengalami keruntuhan di Indonesia. Keruntuhan bangunan jembatan dapat disebabkan karena penggunaan yang melebihi kapasitas struktur serta tidak adanya program pemeliharaan jembatan (Joni, 2017). Peristiwa keruntuhan jembatan mengakibatkan kerugian yang beragam baik jangka pendek maupun panjang yaitu berkaitan dengan sosial, mobilitas masyarakat, kemacetan, ekonomi, pariwisata, perdagangan serta lingkungan.

Monitoring kondisi struktur jembatan perlu dilakukan guna menjamin bahwa infrastruktur

jembatan yang sudah dibangun berada dalam kondisi prima meskipun dengan umur layan yang tidak lagi muda. Apabila diketahui terdapat indikasi adanya kelemahan struktur dapat segera diantisipasi dengan melakukan rehabilitasi atau penguatan struktur bangunan.

Monitoring struktur jembatan terhadap beban aktual kendaraan dapat dilakukan antara lain dengan menggunakan bantuan sensor *accelerometer*. Melalui sensor *accelerometer* yang dipasang pada elemen struktur jembatan eksisting dapat diperoleh data *acceleration time history*. Nilai *acceleration time history* merepresentasikan kondisi sesungguhnya beban dinamis kendaraan yang terjadi pada struktur jembatan. Dari grafik *acceleration time history* dapat diketahui frekuensi aktual jembatan yang mencerminkan kondisi kesehatan jembatan secara umum (Pusjatan, 2017). Analisis struktur dinamik linear *time history* dapat dikerjakan untuk memeriksa secara lebih spesifik perilaku struktur jembatan serta kondisi elemen frame struktur jembatan yaitu gaya dalam, kapasitas penampang struktur hingga lendutan struktur jembatan. Jika terdapat indikasi adanya kerusakan lokal pada struktur jembatan dapat segera diantisipasi guna mencegah ketidakstabilan sampai dengan keruntuhan bangunan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Structural Health Monitoring System

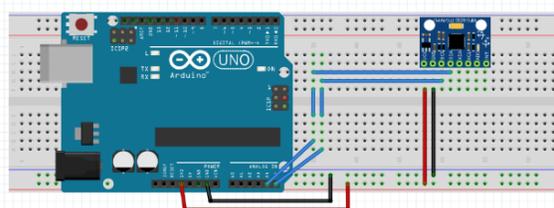
Structural Health Monitoring System (SHMS) telah menjadi daya tarik dalam beberapa dekade terakhir karena dampaknya yang signifikan dalam meningkatkan keandalan struktur bangunan eksisting namun di sisi lain juga menurunkan biaya pemeliharaan. Saat ini SHMS lebih banyak diaplikasikan pada infrastruktur jembatan karena banyaknya bangunan yang masih kurang begitu mendapatkan pemeliharaan memadai. Menurut (Dirjen Bina Marga, 2020) SHMS jembatan adalah pelacakan berbagai aspek kinerja dan integrasi struktur jembatan dalam kaitannya dengan sistem keamanan dan layanan.

SHMS bertujuan untuk menyediakan data respons dinamis struktur jembatan, data untuk melakukan analisis dan evaluasi kesehatan struktur, mengestimasi kerusakan dan penurunan kinerja struktur jembatan serta melakukan pengambilan keputusan terkait dengan pembatasan beban lalu lintas dan metode pemeliharaan jembatan yang paling sesuai (Setiati dan

Ghafiruzzambi, 2022). Monitoring kondisi jembatan memiliki berbagai manfaat diantaranya yaitu untuk menentukan metode pemeliharaan yang paling sesuai dan efektif, memperpanjang usia layan jembatan, serta mencegah kerugian serta bencana akibat keruntuhan jembatan yang tiba-tiba (Jang, S and Spencer, B, 2015).

2.2. Sensor Accelerometer

Menurut (Dirjen Bina Marga, 2020) sistem monitoring kesehatan struktur jembatan merupakan integrasi dari berbagai komponen salah satunya unit sensor. Salah satu jenis sensor yang kerap digunakan adalah sensor *accelerometer*. Sensor *accelerometer* dapat dibuat menggunakan perangkat elektronik *Arduino Gyroscope MPU6050*. Sensor tersebut mampu mengukur besarnya akselerasi benda berdasarkan orientasi gerak pada tiga arah sumbu, yaitu x, y, dan z (Dejan, 2019). Dengan menggunakan perangkat *arduino nano* data akselerasi yang ditangkap oleh sensor dapat diolah untuk kemudian ditampilkan pada monitor. Sensor tersebut dapat digunakan untuk mengukur berbagai parameter struktur jembatan diantaranya frekuensi alami, ragam getar, gaya dalam, kapasitas *frame* serta lendutan melalui metode analisis berdasarkan data percepatan.



Gambar 1. Circuit diagram sensor *accelerometer* *Arduino Gyroscope MPU6050*

2.3. Frekuensi Alami Jembatan

Frekuensi alami struktur jembatan merupakan frekuensi natural yang terjadi akibat getaran apabila struktur jembatan mengalami gangguan akibat gaya eksternal (Indarto, H. dkk, 2017). Nilai frekuensi alami jembatan dapat digunakan sebagai acuan untuk memeriksa adanya indikasi resonansi struktur. Meskipun kecil struktur jembatan cenderung mengalami resonansi apabila nilai frekuensi beban yang bekerja hampir sama dengan frekuensi alaminya (Wahyuni, E., 2012). Kondisi kesehatan jembatan secara umum dapat didiagnosis berdasarkan rasio frekuensi yang

dapat diperhitungkan berdasarkan persamaan berikut (Pusjatan, 2017).

$$K = \frac{[F_{\text{aktual}} - F_{\text{teoritis}}]}{F_{\text{teoritis}}} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

K = rasio fekuensi (%)

F_{aktual} = frekuensi aktual (Hz)

F_{teoritis} = frekuensi teoritis (Hz)

Apabila selisih antara nilai frekuensi aktual dengan frekuensi teoretis cenderung kecil, maka struktur jembatan diyakini berada dalam kondisi baik sehingga hanya perlu pemeliharaan secara rutin saja tanpa butuh perbaikan. Namun semakin besar nilai rasio frekuensi, jembatan terindikasi mengalami kerusakan yang membutuhkan pemeliharaan dan perbaikan ekstra.

2.4. *Beban Dinamis Aktual Kendaraan*

Beban hidup pada struktur jembatan lalu lintas cenderung didominasi oleh kendaraan yang bergerak melintas dengan kecepatan tertentu (beban dinamis) dari pada kendaraan yan berhenti (beban statis) (Nugraha, W. dkk, 2023). Beban dinamis yang bekerja pada struktur jembatan dapat memicu terjadinya fluktuasi gaya dalam pada komponen struktur jembatan. Fluktuasi tersebut dapat berupa beban yang terjadi lebih besar (amplifikasi) atau lebih kecil (atenuasi) dari pada beban statisnya (Ataei, dkk., 2018).

Demi kemudahan perancangan struktur jembatan, pedoman pembebanan jembatan SNI 1725:2016 (Badan Standarisasi Nasional., 2016) menyederhanakan beban kendaraan (beban lajur dan beban truk) ke dalam kategori beban statis. Untuk mengakomodasi pengaruh dinamis akibat interaksi antara kendaraan bergerak dengan struktur jembatan maka digunakan faktor beban dinamis (FBD) yang nilainya berada pada kisaran 30-40%.

Seiring dengan kemajuan teknologi, kondisi beban aktual kendaraan yang bergerak dapat dengan lebih mudah diukur dan direkam, salah satunya menggunakan instrumen *sensor accelerometer*. *Sensor accelerometer arduino gyroscope MPU6050* mampu mengukur beban dinamis kendaraan serta memproyeksikanya kedalam data *acceration time history* hubungan antara percepatan (g) dan waktu (detik). Dengan

melakukan analisis dinamik linear time history dapat diketahui berbagai parameter struktur jembatan yaitu, gaya dalam, kapasitas struktur hingga lendutan.

2.5. *Kapasitas Struktur Jembatan Rangka Baja*

Objek penelitian merupakan jembatan jenis rangka baja. Perhitungan kapasitas penampang struktur baja dilakukan untuk mengetahui kekuatan struktur terhadap gaya dalam yang terjadi terutama akibat pengaruh beban aktual kendaraan. Kapasitas penampang struktur baja diperhitungkan berdasarkan ketentuan SNI 1729:2010 (Badan Standarisasi Nasional, 2020) dan RSNI T-03-2005 (Badan Standarisasi Nasional, 2005). Jembatan rangka baja merupakan tipe jembatan dengan struktur utama tersusun dari batang – batang baja yang saling terkoneksi membentuk banyak bangun segitiga dalam satu kesatuan struktur yang rigid. Batang – batang baja tersebut hanya akan memikul gaya dalam berupa gaya aksial tarik dan tekan saja. Kapasitas penampang struktur rangka baja dapat diperhitungkan dengan persamaan emipris sebagai berikut :

a. *Kapasitas Batang Tarik*

$$T_u \leq \emptyset n \quad (2)$$

Keterangan:

T_u = Gaya tarik ultimate (kN)

T_n = Tahanan nominal tarik (kN)

∅ = Faktor reduksi (0,9)

b. *Kapasitas Batang Tekan*

$$P_u \leq \emptyset P_n \quad (3)$$

Keterangan:

P_u = Gaya tekan ultimate (kN)

P_n = Tahanan nominal tekan (kN)

∅ = Faktor reduksi (0,85)

c. *Kapasitas Batang Lentur*

$$M_u \leq \emptyset M_n \quad (4)$$

Keterangan:

M_u = Momen ultimate (kN)

M_n = Tahanan momen nominal (kN)

∅ = Faktor reduksi (0,8)

d. *Kapasitas Geser*

$$V_u \leq \emptyset V_n \quad (5)$$

Keterangan:

V_u = Gaya geser ultimate (kN)

V_n = Tahanan geser nominal (kN)

Ø = Faktor reduksi (0,75)

2.6. Lentutan

Berdasarkan (Dirjen Bina Marga, 2009) lentutan akibat beban hidup kendaraan, termasuk kejut harus dibatasi disesuaikan dengan kriteria dan fungsi bangunan jembatan. Lentutan tidak boleh melebihi $L/800$ untuk bentang diantara dua tumpuan dan $L/400$ untuk kantilever.

Rumus perhitungan batas lentutan jembatan rangka baja dengan dua tumpuan ujung dapat dianalisis menggunakan persamaan berikut:

$$\delta_{ijin} = \left(\frac{L}{800} \right) \quad (6)$$

Keterangan:

δ_{ijin} = Batas lentutan (m)

L = panjang jembatan (m)

3. METODE PENELITIAN

3.1. Objek dan Lokasi Penelitian

Objek penelitian adalah Jembatan Tlatar dengan sistem struktur rangka baja seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kondisi Eksisting Jembatan Tlatar

Jembatan tersebut melintang di atas sungai Pabelan yang berhulu di Gunung Merapi. Lokasi jembatan berada di Desa Soka, kecamatan Dukun kabupaten Magelang, Jawa Tengah.



Gambar 3. Lokasi Objek Penelitian

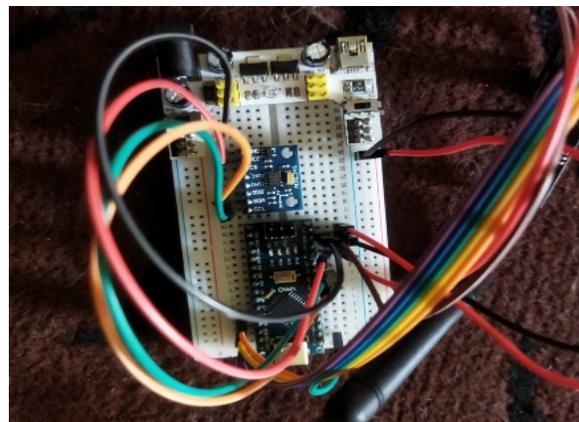
3.2. Tahapan Pelaksanaan Penelitian

a. Penentuan Lokasi Penelitian

Objek penelitian merupakan Jembatan Tlatar sebagai infrastruktur vital penghubung daerah menuju Destinasi Pariwisata Strategis (DPS). Tipe struktur jembatan yaitu rangka baja dengan bentang 40 m.

b. Perancangan dan Perakitan Alat Sensor

Proses perangkaian modul diawali dengan mematri solder pin pada sensor. Pin-pin tersebut kemudian digunakan untuk memasang modul pada *breadboard*. Selanjutnya dilakukan pemasangan kabel jumper sebagai penghubung antar komponen. Modul dihubungkan dengan perangkat komputer untuk dilakukan pemrograman, perekaman, penyimpanan dan pengolahan data.



Gambar 4. Hasil Perakitan Sensor Accelerometer

c. Kalibrasi Alat

Kalibrasi alat merupakan bagian penting dari penelitian untuk memastikan keakuratan pembacaan data. Kalibrasi sensor dilakukan dengan bantuan program *arduino*. Alat yang telah

diinstalasi kemudian dihubungkan dengan komputer untuk melakukan pemrograman *arduino*.

d. Uji Coba Alat

Uji coba juga merupakan bagian penting untuk mengetahui sejauh mana alat mampu beroperasi dan berfungsi. Dengan melakukan uji coba, kita dapat mengetahui apakah alat tersebut dapat berfungsi dengan baik dan menghasilkan data sesuai yang dibutuhkan.

e. Instalasi Alat Sensor di Lapangan

Penggunaan alat sensor sebanyak mungkin tidaklah efektif guna mendapatkan informasi selengkap mungkin terkait dengan kondisi struktur jembatan. Kesesuaian posisi penempatan sensor dan metode pemrosesan data dapat meningkatkan kualitas hasil monitoring kondisi jembatan dari pada menambah sebanyak mungkin sensor (Hartono dan Khoiroh, 2021). Pemasangan alat sensor *accelerometer* pada penelitian ini dilakukan pada seperempat bentang, setengah bentang, dan tiga per empat bentang struktur jembatan.

f. Pengumpulan Data

Penelitian menggunakan jenis data primer dan sekunder. Data primer yang digunakan yakni data percepatan getaran kendaraan (*acceleration time history*). Data sekunder digunakan dalam penelitian ini adalah peraturan pembebanan gravitasi jembatan, pedoman pembebanan gempa, *as built drawing* dan pedoman perhitungan kapasitas struktur jembatan baja.

g. Pemodelan Jembatan

Pemodelan struktur Jembatan dilakukan secara tiga dimensi dengan bantuan *software* SAP 2000. Pemodelan didasarkan pada *as built drawing* serta data hasil survey kondisi lapangan (Nurhidayatullah, E. F. ., & Kurniyawan, T., 2023).

h. Pembebanan

Terdapat dua jenis beban hidup yang digunakan dalam penelitian yaitu, beban rencana sesuai dengan ketentuan SNI 1725:2016 (Badan Standarisasi Nasional., 2016) dan beban aktual kendaraan berdasarkan hasil pembacaan sensor *accelerometer*. Sedangkan beban gempa dihitung dengan metode statik ekuivalen berdasarkan ketentuan SNI 2833:2016 (Badan Standarisasi Nasional, 2016).

i. Analisis Struktur

Analisis struktur jembatan dilakukan dengan metode dinamik linear *time history* menggunakan

data *acceleration time history* kendaraan hasil pembacaan sensor *accelerometer*. Beban *acceleration time history* kendaraan dikombinasikan dengan beban-beban lain sesuai dengan ketentuan peraturan jembatan yaitu beban mati tambahan (MA), beban lajur (TD), beban truk (TT), beban rem (TB), beban pejalan kaki (TP), beban angin struktur (EWS), beban angin kendaraan (EWL), dan beban gempa (EQ).

j. Pemeriksaan Frekuensi Jembatan

Pemeriksaan frekuensi jembatan yaitu perbandingan frekuensi aktual dengan frekuensi alami. Frekuensi alami didapatkan berdasarkan analisis aplikasi SAP 2000. Sedangkan frekuensi aktual kendaraan sesuai dengan hasil pembacaan sensor *accelerometer*.

k. Pemeriksaan Gaya Dalam

Salah satu hasil luaran analisis struktur dinamik linear *time history* adalah gaya-gaya dalam. Pemeriksaan gaya dalam dilakukan dengan membandingkan gaya dalam akibat beban aktual kendaraan dengan beban rencana. Gaya dalam ditinjau pada seluruh elemen struktur jembatan yaitu struktur rangka, gelagar memanjang dan melintang jembatan.

l. Pemeriksaan Kapasitas Struktur Jembatan.

Pemeriksaan kapasitas struktur jembatan dilakukan pada elemen struktur rangka batang, gelagar melintang dan memanjang jembatan. Analisis kapasitas struktur didasarkan pada SNI 1729: 2020 dan RSNI T-03: 2005. Perhitungan dilaksanakan menggunakan data luaran gaya dalam hasil analisis struktur pada dua kondisi pembebanan yakni beban rencana dan beban aktual kendaraan.

m. Pemeriksaan Lentutan Jembatan

Pemeriksaan defleksi atau perubahan bentuk jembatan akibat beban yang terjadi dilakukan berdasarkan kondisi beban aktual dan beban rencana kendaraan. Lentutan hasil analisis dibandingkan dengan lentutan izin jembatan yang tercantum pada persamaan (6).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembebanan

Pembebanan jembatan ditentukan sesuai dengan fungsi, lokasi, kondisi site dan beban aktual kendaraan yang bergerak di atasnya. Secara rinci beban-beban tersebut dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu:

a. Beban Gravitasi Rencana

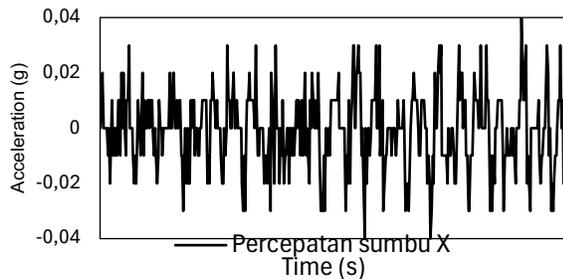
Beban gravitasi rencana diberikan sesuai dengan ketentuan SNI 1725:2016 yang meliputi beban mati tambahan pada slab (MA), beban lajur (TD), beban Truk (TT), beban rem (TB), Beban Pejalan Kaki (TP), Beban Angin Struktur (EW_s) dan beban angin pada kendaraan (EW_L).

b. Beban Gempa

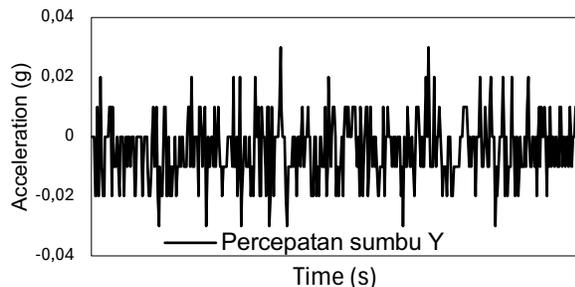
Beban gempa diperhitungkan dengan metode statik ekuivalen berdasarkan ketentuan SNI 2833:2016 dengan nilai-nilai parameter gempa didapatkan dari aplikasi lini PUPR (Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, 2022). Kategori kelas situs yang digunakan adalah jenis tanah lunak (SE). Beban gempa statik diberikan secara lateral di setiap joint struktur jembatan pada dua arah sumbu bangunan secara tegak lurus.

c. Beban Aktual Kendaraan

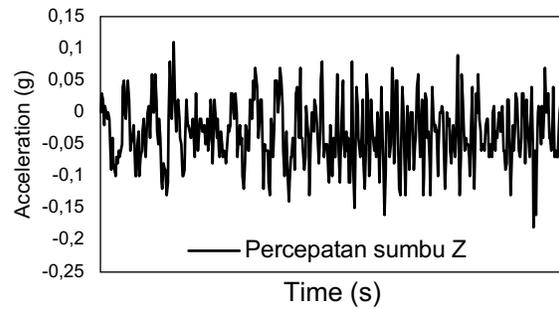
Beban aktual kendaraan diperoleh dari hasil pembacaan sensor *accelerometer* yang dipasang di lapangan. Hasil perekaman sensor dituangkan kedalam grafik *acceleration time history*. Grafik tersebut merepresentasikan percepatan getaran jembatan akibat beban roda kendaraan yang berjalan dalam kecepatan dan selang waktu tertentu. Diperoleh grafik *acceleration time history* dalam tiga sumbu x, y (horizontal) dan z (vertikal).



Gambar 5. Grafik *Acceleration Time History* Sumbu X



Gambar 6. Grafik *Acceleration Time History* Sumbu Y

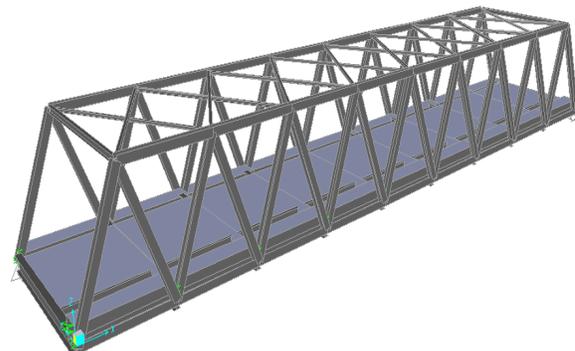


Gambar 7. Grafik *Acceleration Time History* Sumbu Z

Berdasarkan ketiga grafik diketahui bahwa percepatan getaran struktur jembatan paling besar terjadi pada arah vertikal (sumbu z) dengan angka hingga 0,2g sedangkan percepatan pada arah horisontal (sumbu x & y) relatif kecil, nilai maksimumnya hanya berada pada kisaran 0,03-0,04g. Hal tersebut tentunya selaras dengan kondisi pembebanan yang terjadi di lapangan dimana beban kendaraan merupakan tipe beban gravitasi yang menyebabkan lendutan arah vertikal bangunan.

4.2 Pemodelan Struktur Jembatan

Pemodelan struktur jembatan diperlukan untuk menentukan frekuensi alami teoretis dan ragam getar, melakukan analisis struktur dinamik linear time history, hingga pembacaan gaya dalam dan lendutan aktual struktur jembatan. Pemodelan struktur Jembatan dikerjakan menggunakan bantuan *software* SAP2000.

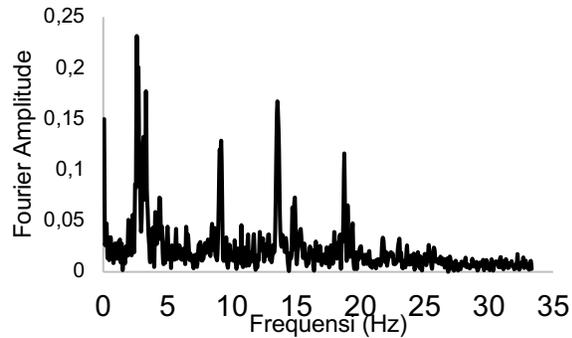


Gambar 8. Pemodelan Struktur Jembatan

Hasil pemodelan struktur jembatan rangka baja dengan *software* SAP 2000 diperoleh frekuensi alami sebesar 2,215 Hz.

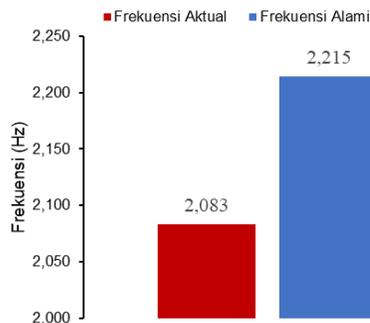
4.3 Perbandingan Frekuensi Jembatan

Dari grafik *acceleration time history* dapat dianalisis nilai frekuensi aktual jembatan dengan mengkonversi kedalam grafik *Fast Fourier Transform* (FFT).



Gambar 9. Grafik *frequency-fourier amplitude* Jembatan Tlatar Arah Z

Berdasarkan grafik diketahui bahwa nilai *fourier amplitude* tertinggi yaitu sebesar 0,231 terjadi pada frekuensi 2,083 Hz.



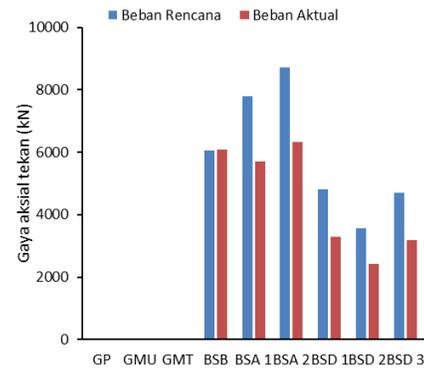
Gambar 10. Grafik Perbandingan Frekuensi Jembatan

Diperoleh nilai frekuensi aktual jembatan eksisting lebih rendah dari pada frekuensi alami teroretis jembatan. Tidak terdapat adanya indikasi baik resonansi maupun getaran yang berlebihan terjadi pada struktur jembatan eksisting. Rasio frekuensi aktual terhadap frekuensi alami jembatan sebesar 5,923%. Sebagian elemen jembatan didiagnosis mengalami cacat kecil saja sehingga tidak memerlukan perbaikan yang mendesak melainkan hanya membutuhkan perawatan secara rutin (Pusjatan, 2017)

4.4 Pemeriksaan Gaya Dalam Jembatan

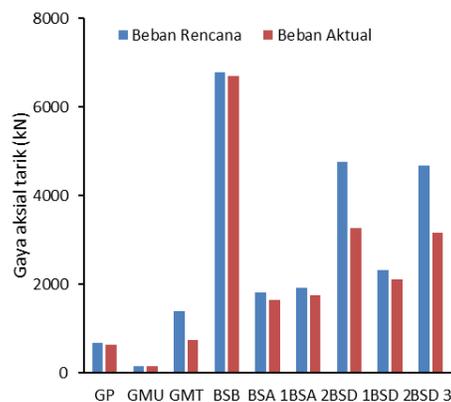
Gaya dalam hasil analisis struktur ditinjau dalam dua kondisi, yaitu akibat pengaruh beban

hidup rencana kendaraan dan beban dinamik aktual kendaraan (*acceleration time history*). Analisis struktur menggunakan data *acceleration time history* arah sumbu z (vertikal) sesuai dengan arah kerja beban kendaraan dan merupakan nilai percepatan paling besar diantara ketiga sumbu.



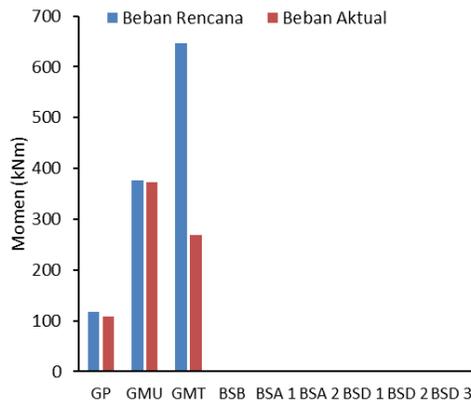
Gambar 11. Grafik Perbandingan Gaya Aksial Tekan

Berdasarkan diagram diketahui bahwa gaya aksial tekan (P_u) didominasi oleh struktur rangka batang samping (BSB, BSA & BSD) sedangkan pada elemen gelagar (GP, GMU & GMT) tidak terjadi. Hasil analisis menunjukkan bahwa gaya aksial tekan (P_u) yang terjadi pada struktur rangka batang samping akibat pengaruh beban aktual kendaraan masih belum melampaui beban rencana. Hal tersebut menjelaskan bahwa saat ini gaya dalam elemen struktur rangka batang jembatan eksisting belum mencapai kondisi ultimate. Guna memastikan kinerja elemen struktur rangka batang samping secara lebih jelas, perlu diperiksa kapasitas struktur batang.

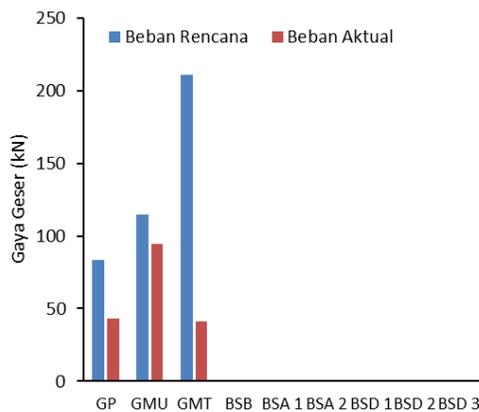


Gambar 12. Grafik Perbandingan Gaya Aksial Tarik

Hampir sama dengan kondisi gaya aksial tekan, hasil analisis menunjukkan bahwa gaya aksial tarik (P_u^+) lebih dominan terjadi pada struktur rangka batang samping (BSB, BSA & BSD). Gaya tarik yang terjadi pada elemen gelagar (GP, GMU & GMT) relatif kecil bahkan dapat diabaikan. Gaya tarik aktual yang terjadi pada elemen struktur rangka batang samping belum mencapai keadaan batas ultimate. Namun meski begitu, masih perlu dilakukan analisis yang lebih mendetail pada elemen frame jembatan melalui pemeriksaan kapasitas struktur.



Gambar 13. Grafik Perbandingan Momen



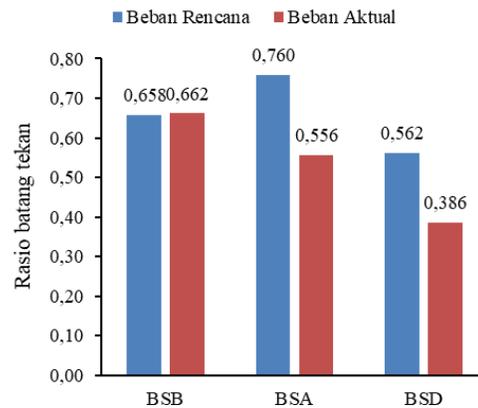
Gambar 14. Grafik Perbandingan Gaya Geser

Sebaliknya, gaya dalam momen (M_u) dan geser (V_u) lebih dominan terjadi pada struktur gelagar (GP, GMU & GMT) dibandingkan struktur rangka batang samping (BSB, BSA & BSD) yang nilainya sama dengan 0. Nilai momen aktual yang relatif lebih kecil dari pada momen rencana mengindikasikan bahwa gelagar memanjang (GP) dan gelagar melintang (GMU & GMT) berada dalam kondisi baik. Hal tersebut menunjukkan

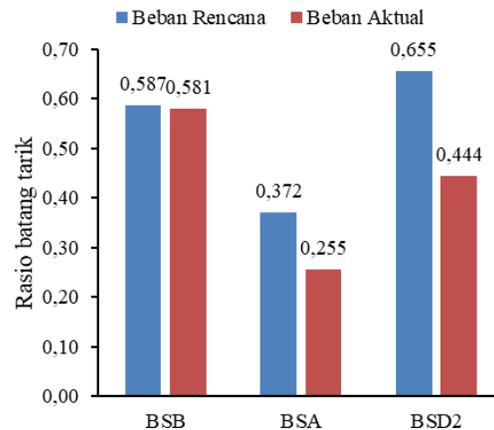
bahwa secara umum gaya dalam yang terjadi akibat beban aktual kendaraan belum mencapai keadaan ultimate. Untuk mengetahui kondisi frame gelagar baja secara lebih detail perlu dilakukan pemeriksaan kapasitas struktur.

4.5 Pemeriksaan Kapasitas Struktur Jembatan

Pemeriksaan kapasitas struktur perlu dilakukan untuk mengetahui secara lebih rinci bagaimana kinerja struktur jembatan dalam memikul beban. Apabila terdapat indikasi adanya kerusakan lokal yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan struktur jembatan maka dapat segera diantisipasi. Pemeriksaan kapasitas struktur jembatan dalam penelitian ini dilakukan dengan meninjau beban pada dua kondisi yaitu beban rencana dan beban aktual kendaraan.

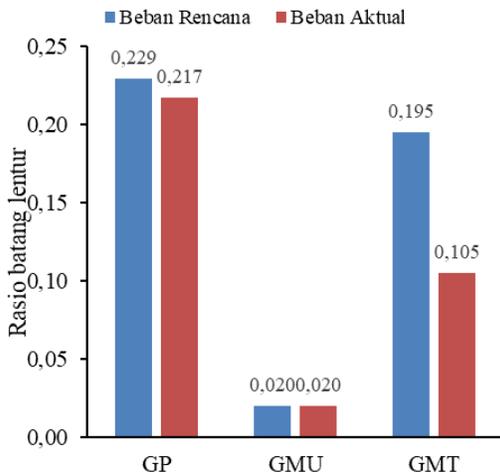


Gambar 15. Grafik Perbandingan Rasio Batang Tekan

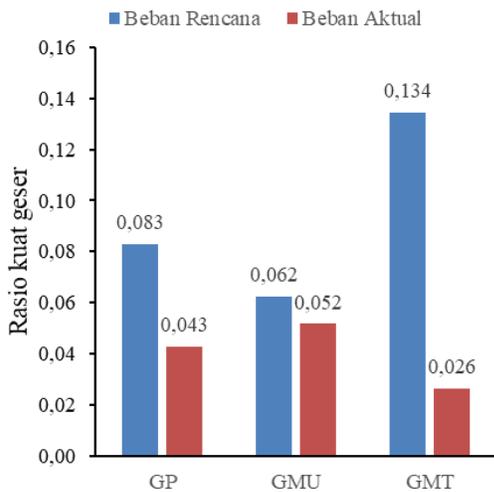


Gambar 16. Grafik Perbandingan Rasio Batang Tarik

Pemeriksaan kapasitas struktur rangka batang yang terdiri dari batang samping bawah (BSB), batang samping atas (BSA) dan batang samping diagonal (BSD) menghasilkan rasio < 1 yang berarti bahwa baik pada kondisi beban rencana maupun beban aktual kendaraan, struktur mampu menahan gaya aksial tarik dan tekan yang terjadi. *Frame* baja mengalami tegangan penampang kurang dari tegangan leleh material baja (f_y) sehingga deformasi material baja masih tergolong dalam kategori elastis.



Gambar 17. Grafik Perbandingan Rasio Batang Lentur



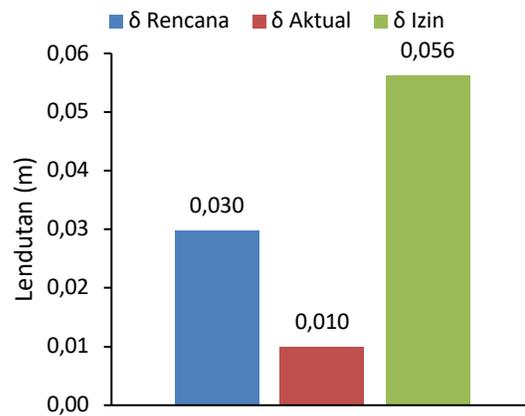
Gambar 18. Grafik Perbandingan Rasio Kuat Geser

Pemeriksaan kapasitas struktur gelagar yang terdiri dari gelagar panjang (GP), gelagar melintang tengah (GMT), dan gelagar melintang ujung (GMU) menghasilkan rasio < 1 . Gelagar

struktur jembatan tidak berpotensi mengalami kerusakan tekuk defleksi dan geser akibat beban rencana maupun beban aktual kendaraan. Akibat beban gravitasi gelagar mengalami defleksi namun masih mampu kembali ke bentuk sempurna (deformasi elastis).

4.6 Perbandingan Lentutan Jembatan

Lentutan struktur jembatan dianalisis berdasarkan simulasi beban rencana dan beban aktual kendaraan. Nilai lentutan diambil yang terbesar, yaitu terjadi pada titik buhul yang berlokasi di tengah bentang struktur rangka samping. Hasil analisis lentutan kemudian dibandingkan dengan lentutan izin sesuai dengan persamaan (6).



Gambar 19. Grafik Perbandingan Lentutan Jembatan

Diagram menunjukkan bahwa lentutan akibat beban aktual kendaraan lebih kecil dari beban rencana. Lentutan berdasarkan simulasi dua kondisi pembebanan menunjukkan nilai yang lebih kecil dari batas izinnya. Hasil analisis lentutan merepresentasikan kondisi struktural jembatan termasuk dalam keadaan baik.

4.7 Rekomendasi Berdasarkan Kondisi Struktur

Hasil analisis kondisi struktur jembatan akibat beban aktual dan beban rencana kendaraan ditinjau dari parameter frekuensi, gaya dalam, kapasitas struktur hingga lentutan merepresentasikan kondisi struktur eksisting yang baik. Meskipun demikian, Jembatan tetap memerlukan perawatan preventif untuk mencegah terjadinya kerusakan serta menjaga kinerja

struktur. Perawatan preventif dilakukan secara berkala dengan inspeksi rutin, perbaikan dan renovasi, serta pemantauan kinerja.

5. KESIMPULAN

- Frekuensi aktual jembatan menunjukkan nilai sebesar 2,083 Hz lebih kecil dibandingkan frekuensi alami sebesar 2,215 Hz dengan nilai rasio frekuensi keduanya yaitu 5,923%.
- Gaya dalam struktur jembatan akibat beban aktual kendaraan baik pada elemen struktur rangka batang maupun gelagar belum mencapai keadaan ultimate.
- Pemeriksaan kapasitas struktur jembatan baik pada elemen struktur rangka batang maupun gelagar menghasilkan rasio < 1 sehingga tidak terindikasi mengalami kerusakan lokal.
- Lendutan akibat beban aktual kendaraan menunjukkan nilai yang lebih kecil dari pada beban rencana. Lendutan keduanya lebih kecil dari batas izin.
- Hasil analisis parameter frekuensi, gaya dalam, kapasitas struktur, dan lendutan menunjukkan bahwa struktur jembatan eksisting termasuk berada dalam kondisi baik. Meskipun demikian, jembatan tetap memerlukan perawatan preventif untuk mencegah terjadinya kerusakan serta menjaga kinerja struktur jembatan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Ataei, dkk. (2018). *Investigating dynamic amplification factor of railway masonry arch bridges through dynamic load tests. Construction and Building Materials*, 183 , 693–705.
- Badan Pusat Statistik (BPS) . (2023). *Statistik Indonesia 2023*. Jakarta : Badan Pusat Statistik .
- Badan Standarisasi Nasional. (2005). *RSNI T-03-2005 Perencanaan struktur baja untuk jembatan*. Jakarta , Indonesia: BSN .
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 1725-2016 Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta, Indonesia : Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 2833: 2016 Perencanaan jembatan terhadap beban gempa*. Jakarta: BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. (2020). *SNI 1729: 2020 Spesifikasi untuk bangunan gedung*

baja struktural (ANSI/AISC 360-16, IDT). Jakarta , Indonesia : BSN.

- Dejan. (2019). *Arduino and MPU6050 Accelerometer and Gyroscope Tutorial*. Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan. (2022). Aplikasi Lini.
- Dirjen Bina Marga. (2009). *Manual Konstruksi dan Bangunan Pemeriksaan Jembatan Rangka Baja* . Jakarta, Indonesia : Kementrian PUPR .
- Dirjen Bina Marga. (2020). *Spesifikasi Khusus Interim Sistem Monitoring Kesehatan Struktur (MKS) Jembatan*. Jakarta: Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Hartono dan Khoiroh. (2021). *Evaluasi Rencana Pemasangan Sensor Structural Health Monitoring System Jembatan Pulau Balang II*. *Teras Jurnal* , 11(2), 423 – 436.
- Indarto, H. dkk. (2017). *Kajian Perilaku Dinamik Struktur Jembatan Penyeberangan Orang Dua Lantai Akibat Beban Manusia Yang Bergerak*. *Jurnal Teknik* , 38(1), 1-5.
- Jang, S and Spencer, B . (2015). *Structural Health Monitoring for Bridge Structures using Smart Sensors*. Campaign, United State of America (USA): *Newmark Structural Engineering Laboratory* (NSEL).
- Joni, I. G. (2017). *Faktor - faktor Penyebab Kegagalan Stuktur Jembatan*. Bali : Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana .
- Kementrian PUPR. (2024). *Jumlah Jembatan Nasional*. Retrieved 06 12, 2024.
- Nugraha, W. dkk. (2023). *Penentuan Faktor Beban Dinamis Pada Jembatan Berdasarkan Pengukuran Bridge Weigh In-Motion*. *Jurnal Jalan - Jembatan* , 40(2).
- Nurhidayatullah, E. F., & Kurniyawan, T. (2023). *Analisis Perbandingan Struktur Jembatan Tipe I-Girder Dengan U-Girder Beton Prategang (Studi Kasus : Jembatan Mojorejo Kecamatan Nglipar Kabupaten Gunungkidul)*. *RENOVASI : Rekayasa Dan Inovasi Teknik Sipil*, 8(1).
- Pusjatan. (2017). *Penentuan Nilai Kondisi & Tingkat Kenyamanan Jembatan Korelasi terhadap Degradasi Frekuensi Alamu*. Jakarta : Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat .
Setiati dan Ghafiruzzambi. (2022). SHMS Sebagai Solusi Teknologi Monitoring Online untuk Mengevaluasi Kondisi Jembatan. Prosiding Konferensi Regional Teknik Jalan . 15, pp. 1- 13 . Bogor : Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia (HPJI).
- Supriyadi dan Muntohar. (2007). Jembatan. Yogyakarta: Beta Offset.
- Wahyuni, E. (2012). Studi Kelakuan Dinamis Struktur Jembatan Penyeberangan Orang (JPO) Akibat Beban Individual Manusia Bergerak. Jurnal Teknik Sipil , 19 (3), 181 – 194.