

AKUISISI DATA VIBRASI UJI DINAMIK JEMBATAN

Anton Husen Purboyo
Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian Pekerjaan Umum dan
Perumahan Rakyat
a.huspur@gmail.com

Iwan Zarkasi
Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian Pekerjaan Umum dan
Perumahan Rakyat
Iwanzark17@yahoo.com

Abstract

Assessment of bridge performance is a primary indicator which could be used in prioritizing bridge maintenance programs. The dynamic loading test on the bridge is one of the tools that can be used in assessing the performance of the bridge. This dynamic loading test offers convenience and speed as well as accuracy regarding the integrity of the bridge structure and has been commonly used in the operation of the Bridge Monitoring System. This study examines the standard method of implementing the dynamic test vibration data acquisition of the bridge before it is used in interpreting the behavior of the bridge structure. The results indicate that the filtering process must be applied in accelerometer data collection, because the filtering process can remove both frequencies smaller than 1 Hz and noise obtained from accelerometer readings. In addition, the behavior of the first integration shows the same tendency as the initial hypothesis, while the behavior of the second integration does not match the initial hypothesis proposed.

Keywords: bridge performance; dynamic loading test; bridge structural integrity; bridge monitoring system; dynamic test vibration data.

Abstrak

Penilaian kinerja jembatan menjadi indikator utama yang dapat digunakan dalam penyusunan prioritas program pemeliharaan jembatan. Pengujian pembebanan dinamik pada jembatan merupakan salah satu alat yang dapat digunakan dalam menilai kinerja jembatan tersebut. Pengujian pembebanan dinamik ini menawarkan kemudahan dan kecepatan serta akurasi mengenai integritas struktur jembatan dan telah biasa digunakan dalam penyelenggaraan Sistem Monitoring Jembatan. Pada studi ini dikaji metode baku pelaksanaan akuisisi data vibrasi uji dinamik jembatan sebelum digunakan dalam melakukan interpretasi terhadap perilaku struktur jembatan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa proses *filtering* harus diterapkan dalam pengambilan data *accelerometer*, karena proses *filtering* tersebut dapat membuang frekuensi yang lebih kecil dari 1 Hz dan *noise* yang didapat dari hasil pembacaan *accelerometer*. Selain itu, perilaku integrasi pertama menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hipotesis awal, sedangkan perilaku integrasi kedua tidak sesuai dengan hipotesis awal yang diajukan.

Kata-kata kunci: kinerja jembatan; pengujian pembebanan dinamik; integritas struktur jembatan; sistem monitoring jembatan; data vibrasi uji dinamik.

PENDAHULUAN

Sebagai salah satu metode pengujian pembebanan jembatan yang sering dilakukan, pengujian pembebanan dinamik pada jembatan menawarkan kecepatan dan kemudahan dalam pelaksanaannya. Disebut cepat karena pengujian ini dapat dilaksanakan dalam waktu relatif lebih singkat dibandingkan dengan pengujian pembebanan statik, dan dikatakan mudah karena dengan adanya kemajuan teknologi serta metode analisis, pengujian pembebanan dinamik ini dapat mengandalkan beban lalu lintas sebagai sumber eksitasi getaran di jembatan.

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki sekitar 93.000 unit jembatan, dengan sebagian besar tersebar di ruas jalan kabupaten/kota, yaitu sebanyak 72.000 unit jembatan, dan sisanya, yaitu sebanyak 21.000 unit jembatan, berada di ruas jalan nasional. Hal ini merupakan tantangan bagi Direktorat Jenderal Bina Marga dalam mempertahankan fungsi jembatan-jembatan tersebut selama umur layannya.

Pengujian pembebanan statik, meskipun dapat memberikan hasil pengujian yang aktual, tidak efektif dan tidak ekonomis ketika dihadapkan pada jumlah jembatan yang sangat banyak. Pengujian pembebanan statik memerlukan pengalihan sumber daya manusia serta peralatan yang banyak, terutama pada jembatan bentang panjang, sehingga membutuhkan biaya yang cukup tinggi dalam pelaksanaannya.

Pengujian pembebanan dinamik dapat dijadikan sebagai alternatif untuk mengetahui kapasitas jembatan karena kelebihan-kelebihan yang dimilikinya. Terdapat aspek-aspek yang masih perlu dibenahi dalam rangka peningkatan kualitas hasil *output* pengujian pembebanan dinamik. Salah satu hal yang dapat dilakukan dalam pengembangan tersebut adalah dengan menambah tahapan mengenai pengolahan data percepatan hasil pembacaan sensor hasil pengujian beban dinamik pada jembatan.

Pada studi ini dilakukan kajian teoritis terhadap hasil pembacaan sensor *accelerometer* pengujian dinamik pembebanan jembatan serta disusun prosedur pengolahan data sensor *accelerometer* sebelum dapat digunakan dalam penentuan kapasitas jembatan. Tujuannya adalah mendapatkan data yang memenuhi ketentuan dasar serta perilaku jembatan yang sesungguhnya berdasarkan pengamatan di lapangan. Ruang lingkup pembahasan dalam makalah ini adalah: (1) melakukan studi literatur terkait pengujian dinamik pada jembatan, dan (2) melakukan analisis data *accelerometer* serta menyusun prosedur evaluasi data *accelerometer* sebelum dapat digunakan dalam perhitungan kapasitas jembatan.

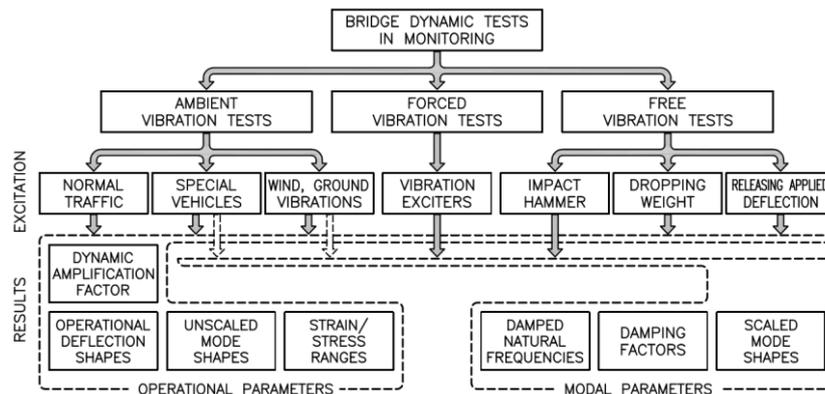
Sistem monitoring jembatan memerlukan data yang layak sebagai dasar penyelenggaraan dan penggunaannya yang efektif pada proses penilaian kondisi struktur. Data yang kurang atau data yang melimpah tetapi tidak melalui prosedur yang layak, membuat setiap sistem menjadi tidak efektif (Zwolksi dan Bien, 2011). Pada sistem monitoring jembatan, data dikumpulkan melalui sistem pengukuran yang dipasang permanen atau melalui pelaksanaan pengujian secara sistematis (FDOT, 2019; FHWA, 2018). Kedua teknik tersebut harus dengan cermat direncanakan dengan mempertimbangkan beberapa parameter berikut:

- 1) Tujuan monitoring serta ukuran dan tingkat kepentingan struktur yang dimonitor.
- 2) Penganggaran belanja untuk material, peralatan, dan biaya layanan pemasangan sistem).
- 3) Ketersediaan peralatan pengujian, yaitu sensor, *exciter*, dan perangkat lunak yang dipakai dalam perolehan data dan pengolahan data.
- 4) Permasalahan logistik, yang meliputi transportasi, catu daya (*power*), perlindungan terhadap kerusakan, dan asuransi.
- 5) Periode pengoperasian yang diharapkan pada sistem monitoring, kuantitas yang diukur, dan tingkat akurasi yang disyaratkan.
- 6) Lokasi titik pengukuran.
- 7) Volume data yang diperoleh selama periode pengukuran, kebijakan, serta format penyimpanan data dan data *sharing*.

Poin-poin tersebut tidak mencakup semua permasalahan yang terkait dengan desain sistem monitoring pada jembatan, tetapi setidaknya dapat memberikan bayangan mengenai tingkat usaha yang diharapkan agar dapat memastikan perolehan data yang layak dan andal.

Kebanyakan metode pengujian dan algoritma dalam rekayasa jembatan merupakan ‘pinjaman’ dari bidang rekayasa mekanika, yang mana fenomena dan analisis modal eksperimental telah dilakukan sejak lama. Meski demikian, penggunaan langsung metode-metode tersebut pada struktur jembatan menghadapi banyak permasalahan sehubungan dengan lebih kompleksnya sifat material-material jembatan, seperti beton, batu, batu bata, tanah atau material komposit. Parameter-parameter modal pada struktur jembatan juga dipengaruhi kondisi lingkungan, seperti temperatur dan kelembaban (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002).

Pemilihan metode pengujian yang tepat dalam artian keterpakaiannya pada sistem monitoring jembatan harus didasarkan kepada analisis mengenai teknik-teknik yang tersedia. Taksonomi mengenai pengujian dinamik pada struktur jembatan diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Taksonomi Pengujian Dinamik Struktur Jembatan

Prinsip Pengujian Dinamik pada Jembatan

Pengujian pembebanan pada jembatan dilaksanakan dengan prinsip (DFT, 2019):

- 1) Beban aktual yang diberikan tidak menyebabkan kerusakan pada struktur.
- 2) Penerapan pengujian pembebanan harus disesuaikan dengan pembebanan rencana jembatan.
- 3) Pengujian harus memberi tegangan dan deformasi yang jelas pada sistem struktur.
- 4) Pengujian harus menggambarkan kapasitas daya dukung struktural.
- 5) Pemasangan *accelerometer* harus mampu membentuk *mode shape* struktur jembatan dan dapat mengeksitasi minimum 12 *mode shape* pertama. Untuk keperluan ini, diperlukan minimum 6 *accelerometer* multi aksial, dengan 18 derajat kebebasan. Posisi *accelerometer* tersebut harus diletakkan sedemikian rupa sehingga dapat menangkap derajat kebebasan yang mampu merepresentasikan 12 *mode shape* tersebut. Pendekatan yang digunakan untuk mendapatkan keduabelas *mode shape* tersebut menggunakan Operational Modal Analysis.

Parameter Penilaian Dinamis

Penilaian kondisi bangunan atas jembatan dengan menggunakan frekuensi alami aktual dimaksudkan untuk melakukan penyederhanaan dalam melakukan analisis. Analisis yang dimaksud tersebut adalah perhitungan ulang frekuensi alami berdasarkan dimensi struktur jembatan yang ditinjau. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan struktur jembatan berdasarkan dimensi yang didapat, sehingga didapat nilai frekuensi model struktur jembatan tersebut. Untuk model yang kompleks biasanya perhitungan struktur dilakukan dengan menggunakan bantuan komputer (PTC, 2007).

Nilai frekuensi ini memiliki korelasi dengan sifat kekakuan struktur jembatan. Beberapa kesimpulan yang dapat diperoleh melalui pengukuran frekuensi aktual di jembatan adalah:

- 1) Penurunan frekuensi alami aktual terhadap nilai frekuensi alami teoritis menunjukkan penurunan keutuhan struktural.
- 2) Parameter kekakuan lentur langsung terkait dengan frekuensi alami aktual, dengan penurunan kekakuan lentur aktual terhadap kekakuan lentur teoritis menunjukkan penurunan kapasitas daya pikul.
- 3) Peningkatan redaman kritis aktual terhadap redaman kritis teoritis beton utuh menunjukkan tingkat kerusakan retakan.

Dengan demikian frekuensi alami getaran jembatan memiliki pengaruh yang dapat diperhitungkan pada respons dinamik jembatan eksisting. Saat ini telah diketahui bahwa mayoritas jembatan di jalan memiliki nilai frekuensi alami sekitar (2–5) Hz, sesuai dengan frekuensi resonansi kendaraan komersial (lihat Gambar 2). Kesesuaian frekuensi ini mengarahkan pada pentingnya amplifikasi tentang respons dinamik struktur jembatan. Kesesuaian yang baik juga telah dijumpai antara frekuensi getaran yang dihitung melalui perhitungan manual atau menggunakan komputer dan hasil yang diperoleh melalui pengujian dinamik.

Hubungan antara bentang jembatan dan frekuensi alami dapat ditentukan melalui persamaan hasil regresi pengujian beban dinamik dari sekitar 898 jembatan jalan, seperti yang terlihat pada Gambar 3, yaitu:

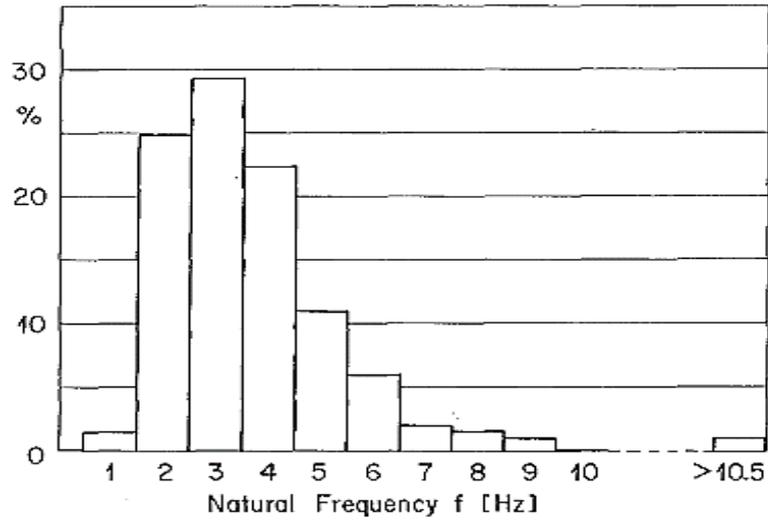
$$f_0 = 82 \times (L)^{-0,9} \quad \text{(Persamaan 1)}$$

dengan:

f_0 = frekuensi alami (Hz);

L = bentang jembatan (m).

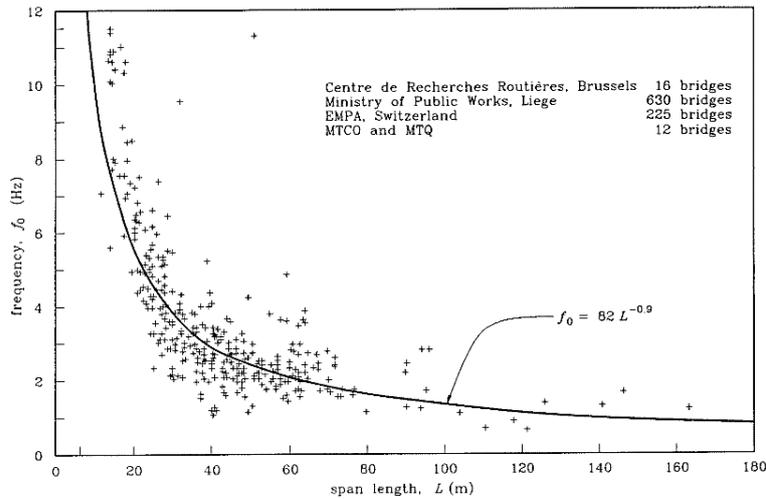
Persamaan 1 seringkali digunakan sebagai pendekatan untuk memastikan bahwa nilai frekuensi pada jembatan yang akan dilakukan pengujian pembebanan dinamik tidak akan berbeda terlalu jauh dengan nilai pada Persamaan 1, sebelum dilakukannya perhitungan dinamik pada jembatan terbangun.



Sumber: Cantieni (1983)

Gambar 2 Distribusi Frekuensi Alami (Hz) untuk 202 Unit Jembatan

Pada struktur jembatan terbangun, perlu dipertimbangkan bahwa kondisi eksisting berbeda dengan kondisi awal. Perlu tahapan yang memastikan bahwa model struktur yang dibuat dapat merepresentasikan kondisi eksisting struktur jembatan.



Sumber: Paultre et al. (1992)

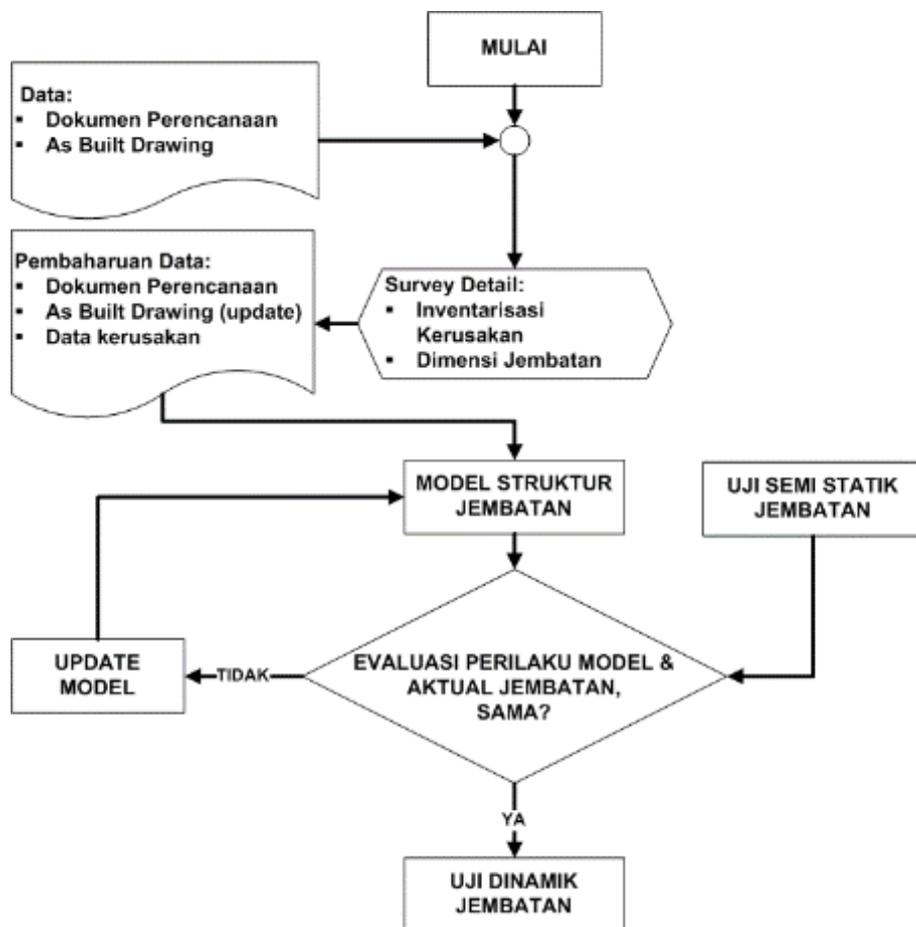
Gambar 3 Hubungan Frekuensi Alami dan Bentang Jembatan

Hal ini dimaksudkan agar penurunan kinerja jembatan selama masa layan dapat terakomodasi dalam model komputer struktur jembatan. Beberapa aspek kinerja struktur jembatan yang perlu dilakukan updating selama masa operasional yang telah ditempuh adalah *fine tuning* model struktur jembatan pada kondisi statik dan pengujian beban dinamik.

Fine tuning model struktur jembatan pada kondisi statik diperlukan untuk mendapatkan kondisi jembatan yang dimodelkan sama dengan kondisi eksisting. Prosedur untuk melaksanakan *fine tuning* ini adalah melalui pemeriksaan detail dan pengujian semi statik.

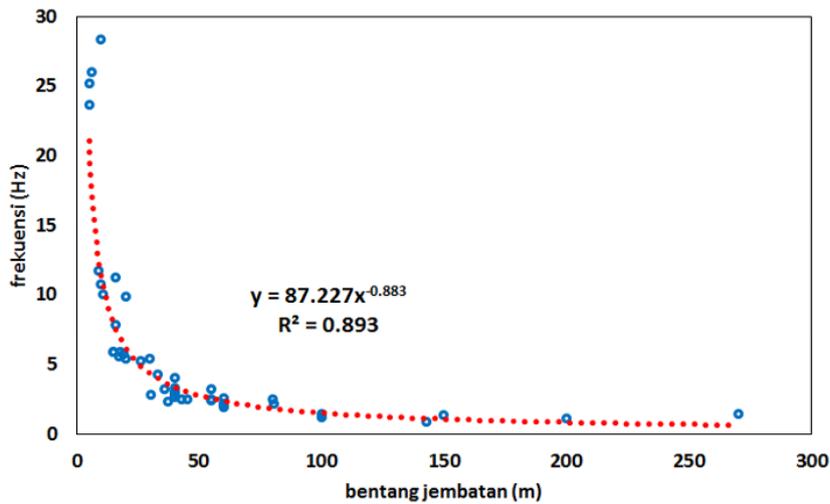
Pemeriksaan detail kondisi jembatan bertujuan untuk melakukan inventarisasi kerusakan yang terjadi serta pengukuran dimensi jembatan sebagai verifikasi terhadap dokumen *as built drawing*. Sedangkan pengujian semi statik bertujuan untuk mendapatkan karakteristik material struktur jembatan. Pendekatan yang digunakan pada pengujian semi statik tersebut adalah melalui deformasi yang terjadi merupakan fungsi karakteristik material eksisting pada struktur jembatan.

Pengujian beban dinamik dilakukan setelah, secara statik, model struktur jembatan yang dibuat memiliki perilaku yang sama dengan struktur jembatan eksisting. Perbedaan nilai frekuensi, rasio redaman, serta karakteristik dinamik lainnya, yang didapat selama melakukan pengujian beban dinamik pada jembatan dengan model struktur yang sudah *update*, dapat memberikan penjelasan mengenai kondisi eksisting struktur jembatan (lihat Gambar 4).



Gambar 4 Proses *Fine Tuning* Model Struktur Jembatan Sebelum Uji Beban Dinamik pada Jembatan

Melalui pendekatan serupa, yang dilakukan oleh Paultre et al. (1992), pendekatan regresi diaplikasikan pada data hasil frekuensi uji beban dinamik jembatan (Ditjen Bina Marga, 2014). Hasil regresi tersebut diperlihatkan pada Gambar 5.



Sumer: Ditjen Bina Marga (2014)

Gambar 5 Hubungan antara Frekuensi Alami (Hz) dan Bentang Jembatan (m)

Hasil regresi tersebut menunjukkan adanya korelasi yang baik, yang ditunjukkan oleh koefisien determinasi yang mendekati 1 atau R^2 sebesar 0,893. Bentuk persamaan yang diberikan juga tidak jauh berbeda dengan hasil studi terdahulu, dengan bentuk persamaan:

$$f_0 = 87,227 \times (L)^{-0,883} \quad (\text{Persamaan 2})$$

Meskipun demikian, secara kuantitas, jumlah jembatan yang diamati berdasarkan data pada Gambar 5, yaitu 50 unit jembatan, masih jauh lebih rendah daripada data jembatan yang terdapat pada Gambar 3, yaitu 898 unit jembatan. Karena itu diperlukan langkah-langkah untuk mengembangkan formulasi tersebut, dan sangat penting untuk selalu memperbaharui data yang ada guna pengembangan bidang dinamika struktur jembatan pada masa mendatang (Burden dan Faires, 2001).

Selama melakukan pengujian beban dinamik pada struktur jembatan, hasil pembacaan primer yang didapat merupakan data percepatan (*accelerogram*). Data tersebut harus diolah terlebih dahulu untuk mendapatkan data frekuensi. Dengan menggunakan data frekuensi, analisis perilaku dinamik jembatan dapat diinterpretasikan untuk mengetahui respons dinamik struktur jembatan yang bersangkutan. Proses tersebut dilakukan dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transformation* (FFT). Bagan alir yang memperlihatkan penjelasan ini dapat dilihat pada Gambar 4.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan selama pengambilan data vibrasi adalah (ICE, 1998):

- 1) Spesifikasi peralatan dan instrumentasi yang digunakan dalam perolehan data *accelerogram*. Sebagai pertimbangan, semakin sensitif sensor yang digunakan (frekuensi bernilai antara 0,5 Hz hingga 1 Hz), semakin mahal harga sensor tersebut. Hal ini dapat menyebabkan tidak efisiennya pengujian dinamik, karena dengan penggunaan sensor yang sangat sensitif, sensor tersebut harus memiliki kapabilitas dalam menangkap besaran

frekuensi lebih luas lagi. Seperti sudah dijelaskan, nilai frekuensi alami untuk mayoritas jembatan adalah (2–5) Hz (Cantiene, 1983), nilai kisaran tersebut dapat dijadikan dasar pemilihan peralatan atau sensor dan instrumentasi sebelum melaksanakan pengujian beban dinamik pada struktur jembatan.

- 2) Tata cara pemasangan sensor. Perlu dipastikan bahwa sensor terpasang benar-benar dapat merepresentasikan getaran pada struktur, terutama pada mekanisme lekatan yang digunakan serta penempatan sensor tersebut di jembatan. Lekatan yang kurang baik dapat menyebabkan sensor terlepas dari tempatnya. Agar hasil bacaan dapat merepresentasikan kondisi aktual, sensor-sensor tersebut harus dipasang pada elemen-elemen jembatan yang sifatnya struktural.
- 3) Lokasi pemasangan dan jumlah sensor. Perlu diperhatikan apakah sudah merepresentasikan jumlah minimum *degree of freedom* untuk mendapatkan jumlah *mode shape* struktur jembatan yang dikehendaki.
- 4) Kondisi cuaca dan temperatur pada saat pengambilan data vibrasi. Perbedaan temperatur yang terlalu besar dapat mempengaruhi hasil bacaan (Lantsoght, 2019), terutama pada material struktur yang sensitif terhadap temperatur, misalnya baja.
- 5) Operasionalisasi peralatan dan instrumentasi perlu diverifikasi terlebih dahulu. *Mal-function* pada peralatan seringkali menyebabkan data yang didapat hanya berupa *noise*, atau malah tidak menunjukkan respons sama sekali. Untuk itu, sebelum pelaksanaan pengujian pembebanan dinamik pada jembatan diperlukan kalibrasi dan simulasi sebagai pemeriksaan awal bahwa sensor berfungsi dengan baik dan siap digunakan.

Memperhatikan penjelasan tersebut serta berdasarkan pengalaman-pengalaman selama melakukan pengujian beban dinamik di jembatan, terdapat hal-hal yang harus dilakukan sebelum melakukan analisis frekuensi menggunakan data yang diperoleh dari pengujian di lapangan, yang meliputi normalisasi dan filtering data *accelerometer* dan skema *single* dan *double integration* data *accelerometer*.

METODE PERHITUNGAN

Evaluasi terhadap data *accelerometer* memiliki kegunaan yang setidaknya akan dapat memberikan penjelasan yang logis mengenai kondisi aktual kinerja jembatan. Definisi yang menjelaskan mengenai parameter-parameter dinamik jembatan akan dapat menjelaskan perilaku jembatan dengan tepat. Dari data *accelerometer* tersebut akan didapatkan nilai frekuensi dan rasio redaman. Besaran tersebut menjadi penting dengan alasan sebagai berikut:

- 1) Berdasarkan penjelasan pada bab sebelumnya, secara sederhana, dapat dikatakan bahwa frekuensi merupakan karakteristik dinamik yang penting dalam hal melakukan evaluasi terhadap hasil uji beban dinamik pada jembatan, setidaknya: (a) frekuensi dapat merepresentasikan kekakuan jembatan, dan (b) frekuensi dapat merepresentasikan kinerja jembatan.

- 2) Sama halnya dengan frekuensi, rasio redaman dapat menjelaskan kinerja struktur, terutama dengan adanya nilai redaman yang langsung berkaitan dengan material struktur jembatan, misalnya baja dan beton.

Berdasarkan pengamatan selama melakukan pengujian dinamik pada jembatan, kadang-kadang dijumpai adanya fenomena yang tidak dapat dijelaskan berdasarkan definisi parameter-parameter dinamik di atas. Untuk keperluan tersebut, pada studi ini, diajukan evaluasi pendahuluan terhadap data *accelerometer* sebelum dapat digunakan dalam menggunakan hasil perhitungan frekuensi dalam melakukan evaluasi kinerja jembatan berdasarkan hasil pengujian pembebanan dinamik pada jembatan.

Evaluasi Pendahuluan Data *Accelerogram*

Sebagai poin-poin awal, diberikan beberapa kaidah yang menjadi ketentuan umum berdasarkan kondisi riil di lapangan. Kesulitan yang terjadi adalah kondisi riil tersebut tidak dapat dijelaskan oleh parameter-parameter *output* data *accelerogram*. Poin-poin tersebut adalah:

- 1) Pada kenyataannya nilai frekuensi alami tidak mendekati 0 Hz. Berdasarkan studi Cantieni (1983), mayoritas jembatan memiliki frekuensi alami pada rentang (2–5) Hz.
- 2) Nilai minimum frekuensi alami untuk jembatan adalah sebesar 1,36 Hz. Penggunaan nilai batas frekuensi sebesar 1 Hz dapat digunakan sebagai ambang batas proses *filtering* data *accelerogram*, dengan mempertimbangkan kepekaan alat atau sensor terpakai.
- 3) Khusus untuk pengujian dinamik pada jembatan dengan menggunakan metode *Forced Vibration*, perlu diperhatikan kondisi batas, yang mana pada saat t mendekati ∞ , nilai v mendekati 0 m/s dan δ mendekati 0 m.

Poin-poin tersebut perlu dievaluasi terlebih dahulu, karena fenomena-fenomena yang tercantum dalam poin-poin tersebut tidak dapat dijelaskan melalui definisi parameter dinamik struktur jembatan. Misalnya: (1) bagaimana menjelaskan fenomena frekuensi alami sama dengan nol Hz; atau (2) bagaimana menjelaskan frekuensi alami lebih kecil daripada 1 Hz sementara sensor yang digunakan tidak memiliki sensitivitas untuk menangkap frekuensi kurang dari 1 Hz; atau (3) bagaimana menjelaskan bahwa skema perhitungan *double integration* pada data *accelerogram* memberikan besaran deformasi dengan nilai tertentu, sementara struktur jembatan tetap diam di tempatnya.

Pada makalah ini, solusi yang diajukan terhadap fenomena tersebut adalah dengan melalui tahapan evaluasi sebagai berikut:

- 1) Melakukan normalisasi data *accelerogram* dengan membuat nilai rata-rata data *accelerogram* menjadi sama dengan nol.

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = 0 \quad (\text{Persamaan 3})$$

- 2) Melakukan *filtering* dengan membuang nilai frekuensi yang lebih kecil dari 1 Hz.
- 3) Memeriksa data *accelerogram* dengan melakukan skema perhitungan *single* dan *double integration*. Hal ini untuk memastikan bahwa data *accelerogram* yang telah ter-update akan memenuhi kondisi batas pada Persamaan 4.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \iint a(t) d^2t = 0 \quad (\text{Persamaan 4})$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int a(t) dt = 0$$

Keuntungan yang didapat melalui evaluasi pendahuluan pada data *accelerometer* adalah bawa pembacaan data vibrasi jembatan tidak lagi memerlukan sensor dengan kepekaan tinggi. Hal ini dapat menurunkan biaya instrumentasi, tetapi tetap memperoleh data dengan kualitas yang sama. Selain itu, penjelasan yang logis pasti didapat berdasarkan parameter-parameter dinamik jembatan, yang diperoleh dari pengujian beban dinamik pada jembatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Pendahuluan Data *Accelerometer*

Data yang digunakan dalam melakukan simulasi mengenai evaluasi pendahuluan tersebut merupakan data hasil pengujian beban dinamik pada jembatan-jembatan: (1) Jembatan Holtekamp; (2) Jembatan Baturusa 2; (3) Jembatan Sei Mentaya; dan (4) *Fly Over* Aur Kuning. Data teknis jembatan-jembatan ini tidak ditampilkan dalam makalah ini, karena bukan merupakan konteks yang dibahas. Karakteristik data *accelerometer* jembatan-jembatan tersebut diperlihatkan pada Tabel 1. Penjelasan mengenai parameter pada Tabel 1 adalah sebagai berikut:

- 1) *Sampling frequency* merupakan jumlah data yang direkam *data logger* setiap detik.
- 2) *Data points* adalah jumlah data pengamatan yang digunakan dalam melakukan analisis dinamik struktur jembatan. Jumlah data points ini harus merupakan kelipatan dari 2^n agar dapat dilakukan analisis FFT.
- 3) *Mean* adalah nilai rata-rata *data points*. Diperlukan kekonsistenan dalam membandingkan nilai rata-rata data *accelerogram*, sampai sejauh mana nilai rata-rata dapat dianggap nol, misalnya 10^{-3} , 10^{-7} , atau 10^{-12} .

Tabel 1 Parameter Data *Accelerometer*

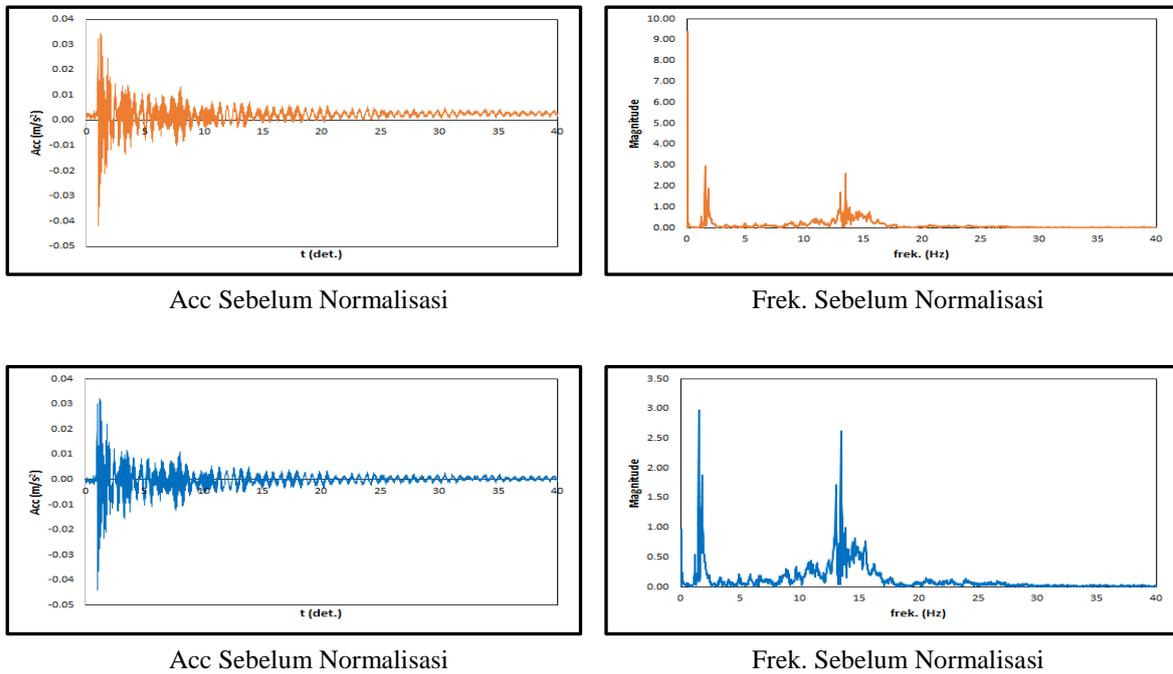
Parameter	Jembatan			
	Holtekamp	Baturusa 2	Sei Mentaya	Aur Kuning
<i>Sampling Freq.</i>	100	100	40	40
<i>Data points</i>	4096	4096	1024	1024
<i>Mean</i>	0,00230	0,00101	0,00017	0,00100

Normalisasi Data *Accelerometer*

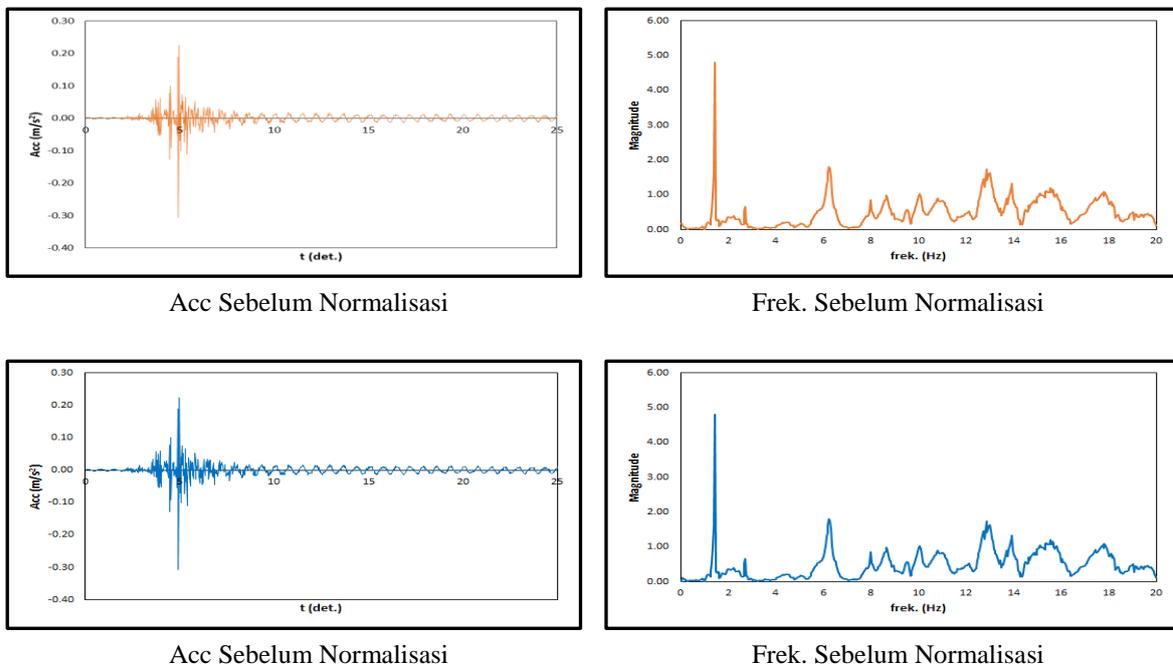
Formula yang digunakan untuk mendapatkan nilai rata-rata data *accelerometer* sama dengan nol adalah dengan menggunakan Persamaan 5.

$$a_i = a_i - \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (\text{Persamaan 5})$$

Prinsipnya adalah dengan meng-*update* setiap nilai data *accelerometer* dengan menggunakan nilai rata-rata awalnya. Hasil normalisasi data *accelerometer* serta frekuensinya diperlihatkan pada Gambar 6 hingga Gambar 9.

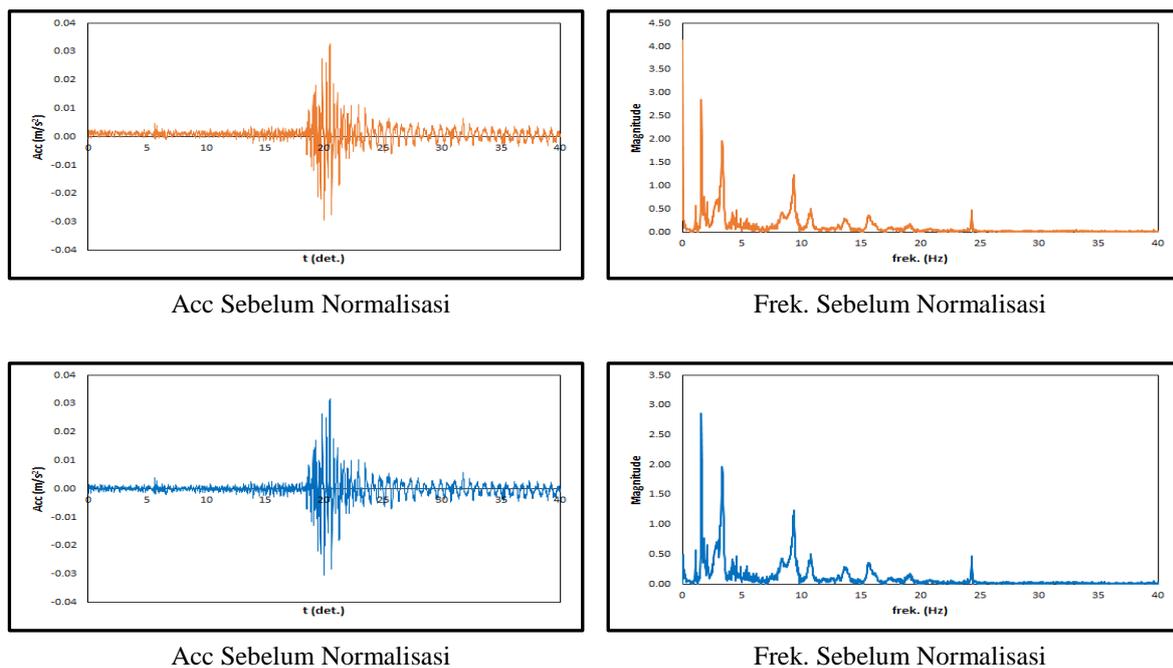


Gambar 6 Normalisasi Data *Accelerometer* Jembatan Holtekamp



Gambar 7 Normalisasi Data *Accelerometer* Jembatan Sei Mentaya

Memperhatikan gambar-gambar tersebut, terdapat 2 keuntungan yang bisa didapatkan, apabila proses normalisasi, atau membuat nilai rata-rata data *accelerogram* menjadi nol, dilakukan, yaitu grafik *accelerometer* menjadi simetri terhadap sumbu aksis. Perubahan ini terlihat jelas pada data *accelerometer* untuk Jembatan Holtekamp, seperti yang terlihat pada Gambar 6. Hal ini dapat menghindari kesalahan pada saat dilakukan perhitungan *single and double integration* data *accelerometer*. Selain itu, *output* data frekuensi menghilangkan nilai *magnitude* pada saat frekuensi sama dengan nol. Hal ini dapat memperbaiki data frekuensi, atau minimal dapat menghilangkan adanya fenomena frekuensi alami terjadi pada saat 0 Hz (Lantsoght et al., 2017).

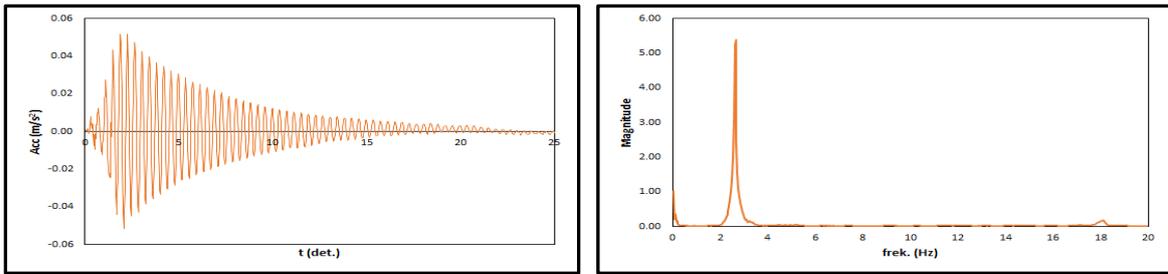


Gambar 8 Normalisasi Data *Accelerometer* Jembatan Baturusa 2

Filtering Data Frekuensi

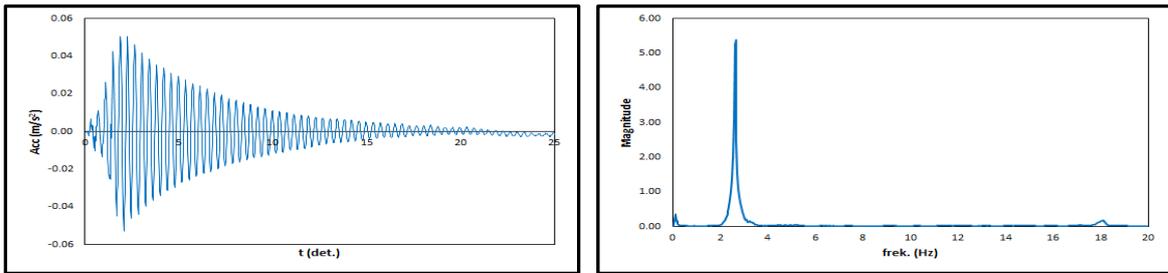
Proses penyaringan data frekuensi ini dilakukan dengan membuang semua frekuensi yang bernilai lebih kecil dari 1 Hz. Dasar pemilihan *filtering* dengan kriteria tersebut adalah bahwa nilai minimum empirik frekuensi alami pada struktur jembatan adalah 1,23 Hz, dan memfasilitasi peralatan dan instrumentasi dengan kepekaan lebih besar dari 1 Hz. Hasil *filtering* dan *update* data *accelerogram* dengan menggunakan data pengujian pembebanan dinamik diperlihatkan pada Gambar 10 sampai dengan Gambar 13.

Memperhatikan hasil proses *filtering* tersebut, terdapat beberapa hal yang dapat dikembangkan untuk pengembangan algoritma akuisisi data vibrasi pengujian pembebanan dinamik jembatan, yaitu: (1) *filtering* dapat dilakukan tidak terbatas hanya dengan membuang frekuensi yang lebih kecil dari 1 Hz, tetapi juga pada *noise* yang terbaca, (2) *fine tuning* secara dinamik berbasis frekuensi dapat dilakukan untuk mendapatkan data *artificial accelerogram*. Hal ini dapat dilakukan apabila setiap *mode shape* struktur jembatan dapat diekstraksi dari data frekuensi dengan membuang *noise* yang terjadi.

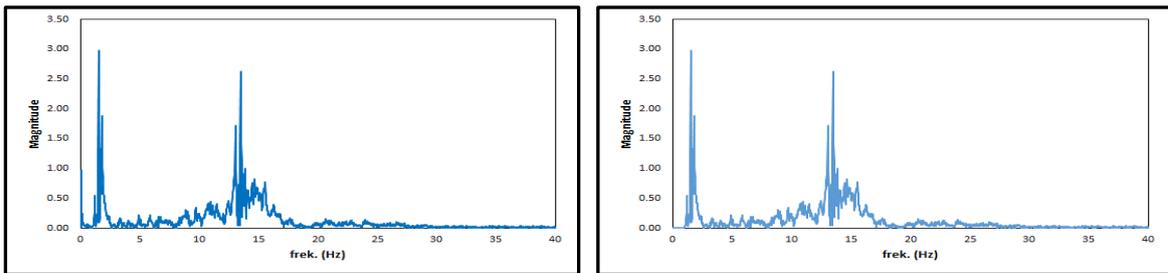


Acc Sebelum Normalisasi

Frek. Sebelum Normalisasi

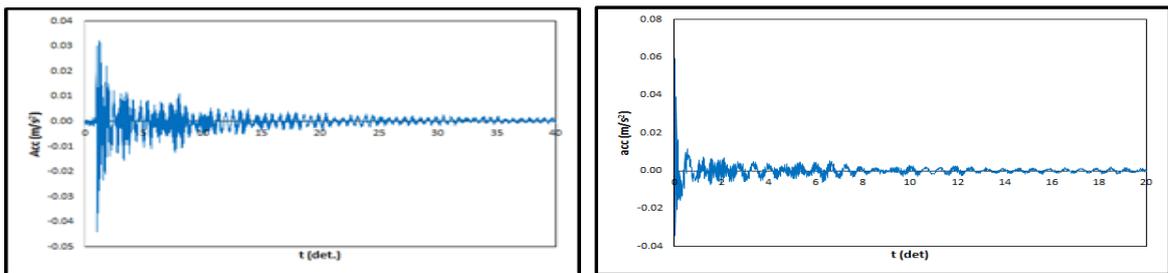


Gambar 9 Normalisasi Data Accelerometer Fly Over Aur Kuning



Frek. Sebelum Filtering

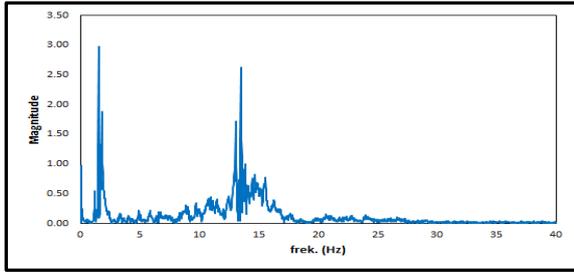
Frek. Sesudah Filtering



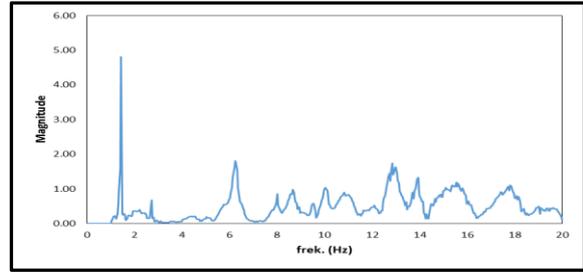
Acc Sebelum Filtering

Acc Sesudah Filtering

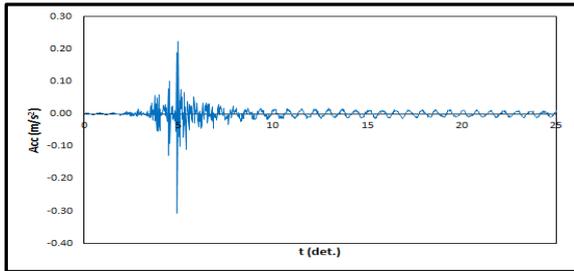
Gambar 10 Updating Data Accelerometer Jembatan Holtekamp



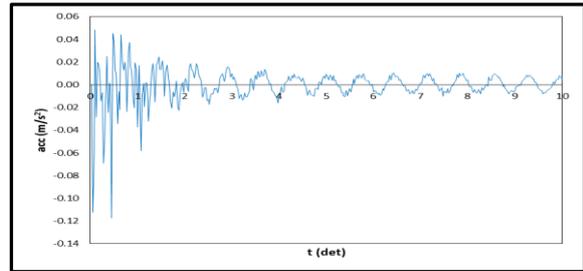
Frek. Sebelum Filtering



Frek. Sesudah Filtering

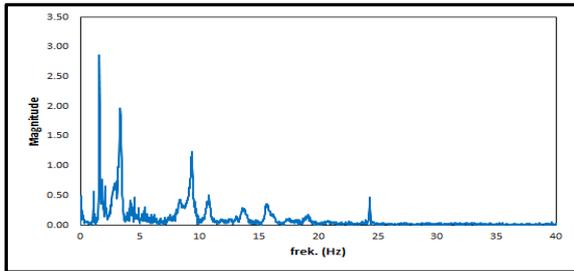


Acc Sebelum Filtering

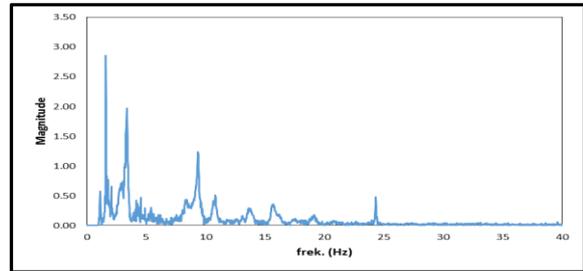


Acc Sesudah Filtering

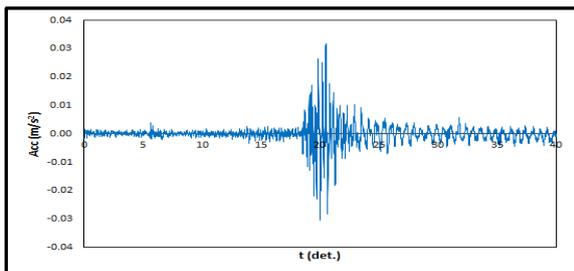
Gambar 11 Updating Data Accelerometer Jembatan Sei Mentaya



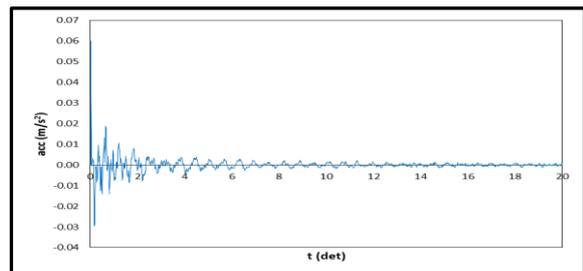
Frek. Sebelum Filtering



Frek. Sesudah Filtering

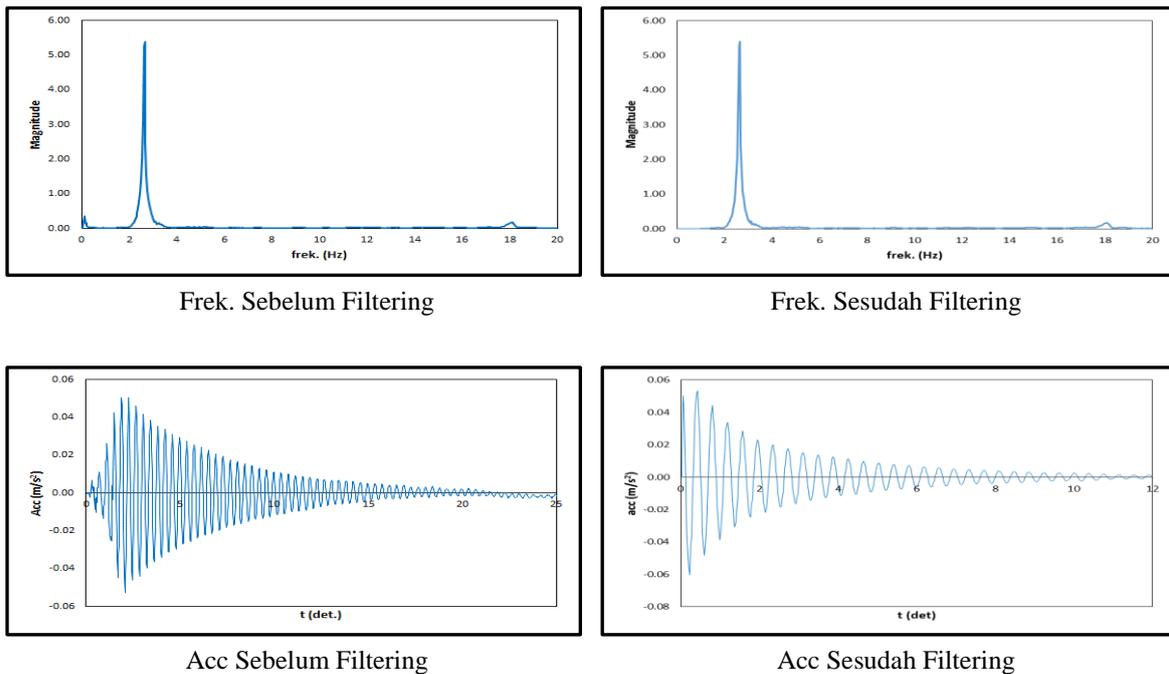


Acc Sebelum Filtering



Acc Sesudah Filtering

Gambar 12 Updating Data Accelerometer Jembatan Baturusa 2

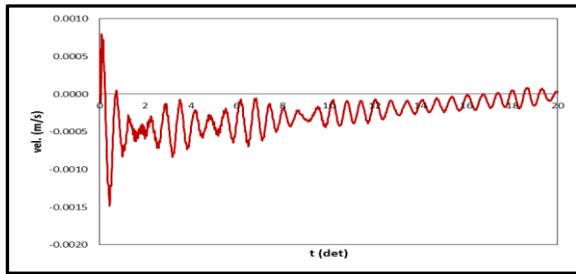


Gambar 13 Updating Data Accelerometer FO Aur Kuning

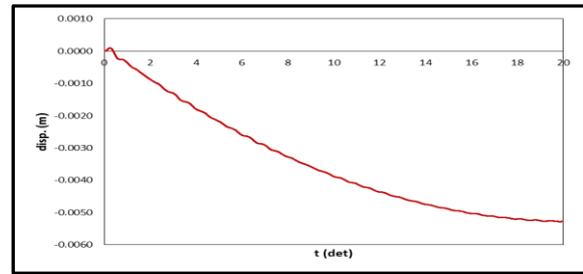
Salah satu manfaat yang dapat dilakukan terhadap penggunaan data *artificial accelerogram* tersebut adalah ketika melakukan penilaian pada pengamatan perilaku eksisting struktur jembatan yang menerima beban berlebih. Data *artificial accelerogram* tersebut digunakan sebagai *input* pada model struktur yang telah dikalibrasi pada kondisi statik, dan data tersebut kemudian dikombinasikan dengan beban statik dan beban getaran kendaraan dengan beban berlebih, sehingga respons jembatan secara keseluruhan dapat ditentukan, dengan mencatat besarnya gaya dalam maksimum pada model struktur.

Integrasi Data Accelerogram

Hasil integrasi berdasarkan data *accelerogram* yang telah di-*update*, diperlihatkan pada Gambar 14 hingga Gambar 17. Hasil integrasi pada *update* data *accelerogram* di tersebut umumnya menunjukkan bahwa: (1) integrasi sesuai dengan hipotesis yang diajukan di awal bahwa semakin lama besarnya kecepatan akan mendekati dan berakhir pada saat nilainya mendekati 0 m/s, (2) integrasi kedua berbeda dengan hipotesis yang diajukan di awal dengan adanya nilai deformasi tertentu, meskipun nilai deformasi ini adalah 10^{-3} m, sehingga perlu dilakukan evaluasi kembali terhadap algoritma yang digunakan serta dilakukan verifikasi terhadap data yang digunakan. Karena itu perlu untuk dilakukan peninjauan terhadap data hasil pengujian lainnya, untuk mengetahui apakah hipotesis kedua tersebut dapat mengkonfirmasi kesesuaian penggunaan algoritma perhitungan dalam studi ini.

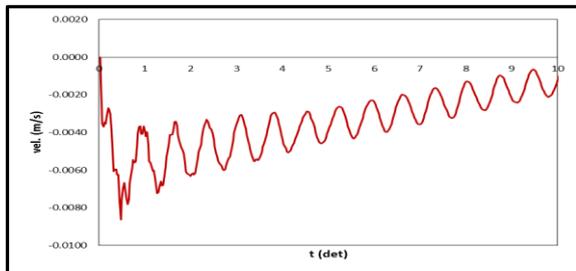


1st Integration

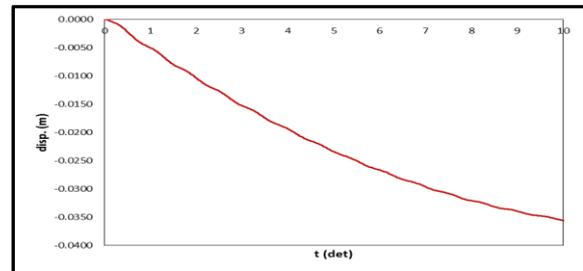


2nd Integration

Gambar 14 Hasil Integrasi *Update* Data Accelerometer Jembatan Holtekamp

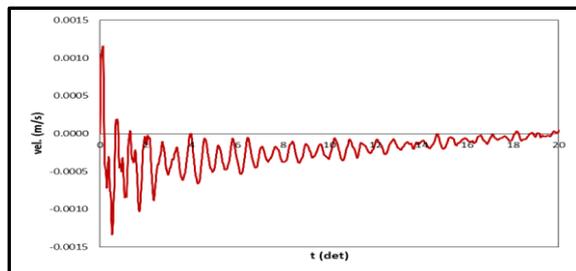


1st Integration

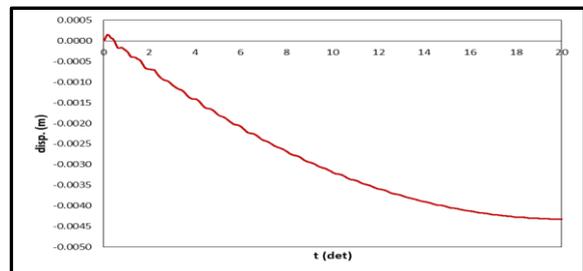


2nd Integration

Gambar 15 Hasil Integrasi *Update* Data Accelerometer Jembatan Sei Mentaya

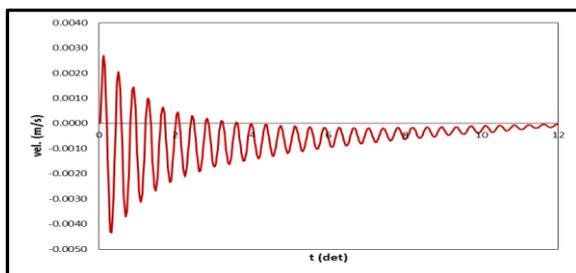


1st Integration

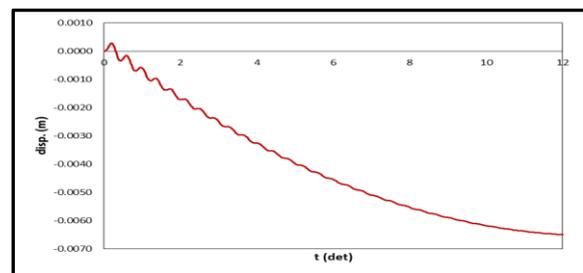


2nd Integration

Gambar 16 Hasil Integrasi *Update* Data Accelerometer Jembatan Baturusa 2



1st Integration



2nd Integration

Gambar 17 Hasil Integrasi *Update* Data Accelerometer Aur Kuning

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pembahasan yang dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa: (1) proses normalisasi data *accelerometer* dapat menghilangkan fenomena frekuensi alami sama dengan 0 Hz, (2) proses *filtering* harus diterapkan dalam pengambilan data *accelerometer*, karena proses *filtering* tersebut tidak hanya membuang frekuensi yang lebih kecil dari 1 Hz, tetapi juga membuang *noise* yang didapat dari hasil pembacaan *accelerometer*, dan (3) perilaku integrasi pertama menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hipotesis awal, yang mana pada saat t menuju tak terhingga, diharapkan kecepatan (v) bernilai sama dengan nol, tetapi perilaku integrasi kedua tidak sesuai dengan hipotesis yang diajukan di awal.

Saran yang dapat disampaikan adalah sebagai berikut:

- 1) Perlu dikembangkan metode baku untuk akuisisi data vibrasi uji dinamik jembatan, agar diperoleh data yang valid dalam penentuan karakter dinamik jembatan.
- 2) Fine tuning berbasis frekuensi dapat digunakan untuk mengkalibrasi model struktur jembatan, sehingga didapatkan model struktur jembatan yang terkalibrasi secara statik dan dinamik.
- 3) Perlu dilakukan tinjauan serta verifikasi terhadap algoritma yang disusun pada studi ini terhadap data pengujian beban dinamik jembatan lainnya.
- 4) Apabila dijadikan sebagai fitur dalam perangkat lunak perekam data vibrasi, metode baku akuisisi data vibrasi uji dinamik jembatan dapat memberi kemudahan bagi pihak pengguna untuk langsung dapat menggunakan dan menginterpretasikan data vibrasi tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Burden, R.L dan Faires, J.D. 2001. *Numerical Analysis. Ninth Edition*. Cengage Learning. Brooks/Cole. Boston, MA.
- Cantieni, R. 1983. *Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland*. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2002. *Penilaian Kondisi Jembatan untuk Bangunan atas dengan Cara Uji Getar*. Pt T-05-2002-B. Pedoman Konstruksi dan Bangunan. Jakarta.
- Department for Transport (DFT). 2019. *CS 463 - Load Testing for Bridge Assessment*. London.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2014. *Laporan Uji Dinamik Jembatan*. Jakarta.
- Federal Highway Administration (FHWA). 2018. *Bridge Preservation Guide: Maintaining A Resilient Infrastructure to Preserve Mobility*. US Department of Transportation. Washington, DC.
- Florida Department of Transportation (FDOT). 2019. *Bridge Maintenance and Repair Handbook*. Tallahassee, FL.

- Institution of Civil Engineers (ICE). 1998. *Guidelines for the Supplementary Load Testing of Bridges*. London
- Lantsoght, E, Van Der Veen, C, De Boer, A, dan Hordijk, D. 2017. Recommendations for Proof Load Testing of Reinforced Concrete Slab Bridges. The 39th IABSE Symposium. Vancouver.
- Lantsoght, E.O.L. 2019. *Load Testing of Bridges: Current Practice and Diagnostic Load Testing*. CRC Press. London
- Parametric Technology Corporation (PTC). 2007. Mathcad 14.0 User's Manual. Boston, MA.
- Paultre, P., Chaalal, O., dan Proulx, J. 1992. *Bridge Dynamics and Dynamic Amplification Factors—A Review of Analytical and Experimental Findings*. Canadian Journal of Civil Engineering, 19: 260–278.
- Zwolski, J. dan Bien, J. 2011. *Modal Analysis of Bridge Structures by Means of Forced Vibration Tests*. Journal of Civil Engineering and Management, 17 (4): 590–599.