

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi darat merupakan hal yang sangat penting dalam pembangunan nasional untuk melakukan kegiatan pelayanan jasa distribusi yang termasuk dalam jasa angkutan dan jasa perdagangan yang tidak dapat dipisahkan satu sama lain. Oleh karena itu jembatan merupakan hal yang penting untuk dijaga kemampuan penggunaannya. Jembatan merupakan bagian dari jalan yang sangat diperlukan untuk sistem jaringan transportasi yang dapat membantu pembangunan nasional di masa yang akan datang (Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, 2009).

Mayoritas jembatan rangka baja di berbagai macam negara sudah sangat tua dan banyak diantaranya merupakan struktur jembatan di Indonesia. Lebih dari setengah jembatan yang ada di berbagai negara termasuk Indonesia, memiliki jembatan yang kurang baik secara struktural dan secara fungsional tidak aman (Chen & Duan, 2014). Pada tahun 2009, ada lebih dari 88.000 jembatan yang telah di bangun di Indonesia. Sebagian kecil dari jembatan tersebut merupakan jembatan peninggalan pada masa penjajahan. Dari 88.000 jembatan yang ada, lebih dari 29.000 jembatan yang merupakan jalan nasional dan provinsi. Salah satu jenis jembatan rangka yang banyak di Indonesia adalah rangka baja. Maka dari itu rangka jembatan harus dilihat dari perencanaan, manufaktur, pelaksanaan hingga perbaikan (Halmshaw, 1987).

Structural health Monitoring (SHM) merupakan sistem yang mampu menentukan serta mengevaluasi kemampuan aktual, kekuatan, dan fungsionalitas dari suatu struktur ataupun material (Comisu & Taranu, 2006). SHM dapat mencegah kerusakan jembatan dengan memperingatkan kerusakan kecil yang terjadi pada jembatan. Dengan demikian, insinyur dapat mengambil tindakan perbaikan untuk mencegah kegagalan jembatan. SHM dapat dilakukan dengan menggunakan pengujian *destructive Test* dan *non-destructive test*. *Destructive test* merupakan pengujian dengan merusak material tertentu untuk menentukan sifat fisiknya, seperti sifat mekanik kekuatan, ketangguhan, fleksibilitas, dan kekerasan. Dengan demikian keunggulan NDT adalah pengujian dapat mengidentifikasi kerusakan seperti cacat, korosi dan retakan tanpa merusak material ataupun struktur. Contoh pengujian NDT adalah metode visual, ultrasonik, radiografik, pusingan arus, partikel magnetik, *penetrant*, *infrared* dan lain-lain (Halmshaw, 1987). Sebagian besar dari pengetesan tersebut harus dilakukan pada lokasi yang tepat dimana terjadi kerusakan yang terkadang tidak dapat diakses atau dijangkau. *Vibration-based method* atau sering disebut dengan VBM merupakan metode alternatif untuk NDT pada umumnya. VBM memiliki keuntungan yaitu alat uji relatif murah, data getaran dapat dikumpulkan dari titik sederhana atau sebagian besar pada beberapa titik pada komponen struktural, dan tidak diperlukan melakukan pengetesan pada bagian yang terjadi kerusakan. Oleh karena itu, VBM adalah metode yang mampu mengukur parameter global struktur yang dapat memberikan informasi tentang keadaan struktur (Sohn & Farrar, 2001). Jembatan akan memiliki karakteristik getaran yang berbeda sesuai dengan kondisi jembatan,

ketika jembatan mengalami kerusakan maka karakteristik getaran akan berubah. Perubahan getaran tersebut dapat ditangkap oleh parameter modal seperti frekuensi alami struktur jembatan.

Pada penelitian ini, dilakukan modal analisis dengan pendekatan numerik untuk analisis VBM NDT pada struktur jembatan Z. Penelitian akan berfokus pada nilai frekuensi natural (ω_n) dan periode (T) dari sebuah model sistem struktur jembatan yang dianggap sebagai *single degree of freedom* untuk mengetahui nilai frekuensi natural struktur jembatan Z. Penurunan kualitas jembatan digunakan parameter modulus elastisitas untuk merepresentasikan jembatan dalam keadaan yang tidak baik. Pada keadaan sesungguhnya penurunan modulus elastisitas tidak terjadi secara langsung, akan tetapi penurunan tersebut adalah pendekatan yang paling mudah untuk dilakukan dalam mendapatkan nilai frekuensi natural kritis dari suatu sistem struktur jembatan. VBM didapatkan dari alat *accelerometer* dalam bentuk nilai akselerasi dari sebuah jembatan, yang akan dikonversi lebih lanjut dengan menggunakan MATLAB R2021b. Hasil konversi yang akan dipakai dalam analisa adalah nilai frekuensi natural aktual struktur jembatan dengan menggunakan *Fast Fourier Transform*. Nilai frekuensi natural dari alat *accelerometer* dan permodelan struktur jembatan Z akan dibandingkan agar dapat melihat keadaan struktur jembatan Z. Setelah itu jembatan akan di analisa lebih lanjut berdasarkan RSNI T-02-2005 dan RSNI T-03-2005, untuk melihat jembatan Z secara aktual dapat menerima beban dan melihat lendutan yang terjadi. Untuk mengetahui batas kekuatan struktur jembatan Z, maka diperlukan permodelan untuk mendapatkan batas bawah atau nilai kritis dari frekuensi natural

dari kekuatan dan deformasi. Jika frekuensi natural dari struktur jembatan Z mencapai nilai kritis, maka lendutan yang terjadi sudah melebihi batas izin dan harus diperlukan tinjauan lebih lanjut oleh insinyur.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan di atas, berikut ini merupakan rumusan masalah yang mendorong penelitian adalah sebagai berikut:

- 1) Bagaimana cara mengidentifikasi kondisi struktur jembatan berdasarkan data berbasis getaran yang dilakukan dengan metode NDT, dengan lendutan izin maksimum dan tegangan izin suatu struktur jembatan?
- 2) Bagaimana cara mengidentifikasi kondisi struktur jembatan berdasarkan nilai frekuensi natural kritis sebagai batas dalam penelitian atau pengetesan selanjutnya?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengidentifikasi kondisi suatu struktur jembatan dengan menggunakan data berbasis vibrasi yang diolah dengan menggunakan program MATLAB R2021b dan melakukan simulasi sederhana berbasis eksperimen dengan menggunakan program SAP2000. Setelah mengolah data dan menyimulasi dari jembatan tersebut, penelitian bertujuan agar dapat mengetahui dan membuktikan korelasi perubahan modulus elastisitas yang dapat mempengaruhi respons getaran dari pada struktur jembatan. Dari parameter tersebut dapat menentukan keadaan struktur jembatan dengan membandingkannya dengan pemodelan agar mendapatkan nilai frekuensi natural kritis.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan penelitian digunakan untuk menghindari adanya penyimpangan maupun pelebaran pokok masalah agar penelitian lebih terarah. Beberapa batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Elemen struktur yang dianalisis dinamis merupakan sistem struktur jembatan.
- 2) Jembatan diberi penamaan jembatan z karena privasi pemilik data.
- 3) Analisa modal berbasis *eigenvalue* dan bukan *ritz vector*. Sehingga parameter dinamis yang dilakukan pada penelitian sesuai dengan *eigenvalue* elemen struktur jembatan.
- 4) Elemen struktur jembatan dianggap *single degree of freedom*, sehingga deformasi hanya ditinjau pada satu arah yaitu gravitasi.
- 5) Nilai yang digunakan pada simulasi program SAP2000 merupakan asumsi berdasarkan RSNI T-02-2005 dan RSNI T-03-2005 hanya sekedar menunjukkan kondisi jembatan berdasarkan data yang diberikan dan bukan untuk keperluan desain sebenarnya.
- 6) *Software* yang digunakan dalam pengolahan data penelitian dan analisa numerik adalah MATLAB R2021b dan SAP2000 *student version* untuk menganalisis dan simulasi struktur jembatan.
- 7) Simulasi struktur jembatan pada program SAP2000 tidak menggunakan dek beton dan hanya rangka baja.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi secara umum penentuan nilai frekuensi natural kritis untuk menentukan kesehatan dari struktur jembatan. Serta mengidentifikasi frekuensi natural struktur dengan menurunkan nilai modulus elastisitas dari material struktur dan parameter lainnya yang ikut berpengaruh dan dilihat nilai dari deformasi dan frekuensi natural untuk menentukan kesehatan struktur jembatan.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan skripsi dengan judul “ANALISIS *NON-DESTRUCTIVE TEST* BERBASIS GETARAN STRUKTUR JEMBATAN Z DENGAN DATA *ACCELEROMETER* MENGGUNAKAN *MODAL ANALYSIS*” memiliki sistematika penulisan sebagai berikut:

1) BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi pendahuluan laporan skripsi yang membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan, batasan penelitian, manfaat serta sistematika penulisan laporan skripsi.

2) BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini berisi tentang penjelasan teori tentang penelitian yang dilakukan dari berbagai sumber. Teori tersebut ditujukan sebagai dasar dan pendukung dari penelitian yang dilakukan.

3) BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang metodologi dan Teknik pengolahan data secara sistematis. Proses yang dilakukan mulai dari studi literatur, simulasi, dan

pengolahan data vibrasi hasil alat *accelerometer* dengan bantuan program SAP2000, microsoft excel, dan MATLAB R2021b.

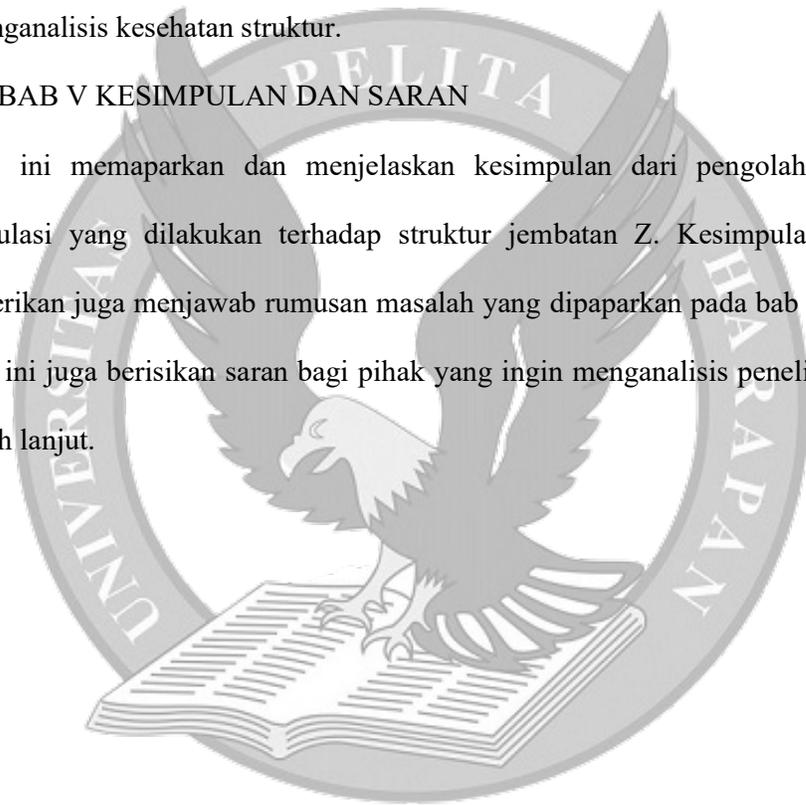
4) BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang paparan hasil pengolahan dan simulasi yang dilakukan dengan bantuan program SAP2000, microsoft excel dan MATLAB R2021b.

Analisa empat model struktur jembatan berdasarkan garis pengaruh dan menganalisis kesehatan struktur.

5) BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memaparkan dan menjelaskan kesimpulan dari pengolahan dan simulasi yang dilakukan terhadap struktur jembatan Z. Kesimpulan yang diberikan juga menjawab rumusan masalah yang dipaparkan pada bab 1. Pada bab ini juga berisikan saran bagi pihak yang ingin menganalisis penelitian ini lebih lanjut.



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pendahuluan

Bab ini akan dijelaskan lebih lanjut mengenai teori yang didapat dari hasil studi literatur mengenai analisa kesehatan struktur jembatan, sehingga dapat mendukung penelitian.

2.2 *Structural Health Monitoring*

Structural health monitoring merupakan sistem pemantauan terintegritas dalam penilaian durabilitas struktur jembatan. Sistem ini mendeteksi kerusakan yang terjadi akibat perubahan bentuk dari sifat material tertentu dan geometri dari struktur. Sistem SHM harus dilakukan dengan gabungan dari inspeksi visual dan mengintegrasikannya dengan sejumlah sensor untuk dapat mengidentifikasi dan memantau kerusakan sehingga struktur jembatan dapat dilihat keadaannya secara berkala (Comisu & Taranu, 2017). Pada penelitian ini, kerusakan struktur jembatan dilihat dengan perubahan dari sifat material yaitu dari nilai lendutan maksimum yang terjadi pada struktur jembatan. Sesuai dengan RSNI T-03-2005 tentang standar perencanaan struktur baja untuk jembatan, lendutan izin (δ) harus

lebih dari $\delta > \frac{\text{Panjang jembatan}}{800}$.

2.3 Jembatan

Jembatan mempunyai peran khusus dalam infrastruktur, yaitu menghubungkan dua titik yang berbeda yang biasanya tidak dapat diakses oleh jalan raya. Oleh karena itu jembatan harus dibangun sesuai perencanaan, desain, konstruksi, operasional, dan pemeliharaan struktur yang terencana dengan baik. Analisis dan

desain struktur harus memperhitungkan semua beban yang harus ditanggung oleh jembatan. Jembatan harus dapat mendukung dek jembatan beton ataupun baja, untuk kendaraan dan pejalan kaki, dan lain-lain. (Gonzalez & Schorr, 2019). Jembatan secara garis besar dapat dibagi menjadi tiga bagian, ditunjukkan sebagai berikut:

- 1) Superstruktur adalah bagian dari struktur yang menopang lalu lintas dan meliputi dek, pelat dan *girder*. Semua bagian jembatan yang dipasang pada sistem pendukung dapat diklasifikasikan sebagai superstruktur.
- 2) Sub struktur adalah bagian dari struktur, yaitu *pier* dan *abutment*, yang menopang bangunan atas dan yang menyalurkan beban struktur ke pondasi.
- 3) Pondasi adalah komponen yang menyalurkan beban dari bangunan bawah ke lapisan bantalan. Tergantung pada sifat geoteknik dari lapisan bantalan, pondasi dangkal atau dalam. Biasanya, pondasi tiang pancang dan sumur digunakan untuk pondasi jembatan.

Jembatan rangka baja pada umumnya dapat berputar atau melendut pada kondisi cuaca yang sangat ekstrem. Untuk mencegah jembatan mengalami hal tersebut, jembatan harus cukup kaku untuk menahan gerakan tersebut dan setiap anggota dari jembatan yang dibuat harus kuat dalam menahan beban yang diletakkan di atasnya (Balasubramanian, 2017). Berdasarkan struktur, terdapat 7 jenis struktur jembatan yang ditunjukkan sebagai berikut:

- 1) Jembatan Lengkung memiliki penyangga di setiap ujungnya. Berat jembatan didorong ke abutment di kedua sisi. Jembatan ini menggunakan

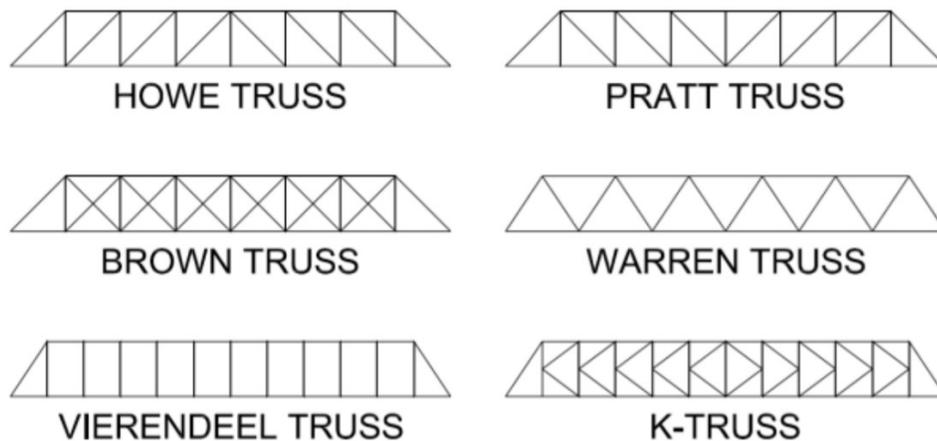
lengkungan sebagai komponen struktural utama. Dibuat dengan satu atau lebih engsel, yang bergantung pada jenis beban dan gaya tegangan yang harus ditanggung. Jembatan lengkung memiliki kekuatan alami yang besar. Jembatan lengkung sering dipilih karena kekuatan dan penampilan yang indah.

- 2) Jembatan Balok merupakan tipe jembatan yang tertua dan paling sederhana yang terdiri dari pilar vertikal dan horizontal balok. Jembatan balok hanya cocok untuk bentang pendek tetapi dapat digunakan untuk penyebrangan yang lebih besar dengan menambahkan tiang dari jembatan.
- 3) Jembatan Rangka merupakan jembatan yang terdiri dari beberapa rangka yang dihubungkan satu sama lain yang terdiri dari kumpulan segitiga karena kekakuannya. Elemen struktur dikonfigurasi dalam bentuk segitiga karena segitiga membuat struktur menjadi lebih stabil. Jembatan rangka sangat kuat dan dapat mendukung beban yang berat.
- 4) Jembatan Kantilever merupakan jembatan yang mempunyai bentang dan hanya didukung di salah satu tumpuan dari struktur jembatan tersebut. Jembatan ini digunakan pada lintas yang sulit karena mudah dibangun. Kekurangannya adalah struktur yang kompleks dan sulit untuk dipelihara.
- 5) Jembatan Gantung merupakan struktur jembatan yang memiliki elemen utama adalah sepasang kabel yang membentang di atas dua tiang dan melekat pada setiap ujung dari jembatan yang dimasukkan jauh di dalam tanah. Setiap beban yang diterapkan pada jembatan diubah menjadi

tegangan pada kabel utama yang harus diangkur dengan kuat untuk menahannya.

- 6) *Cable-Stayed Bridges* mirip dengan jembatan gantung, akan tetapi memiliki prinsip dan konstruksi yang berbeda. Ada 2 kelas utama dari *Cable-Stayed Bridges*, yaitu jenis kipas yang lebih efisien dan *harp* untuk jenis paralel (memungkinkan lebih banyak ruang).
- 7) Jembatan Keliling merupakan jembatan yang dibangun untuk kapal dapat menyeberangi kanal ketika jalur berubah sisi.

Jembatan Z merupakan tipe jembatan rangka baja, dengan demikian ada beberapa jenis jembatan rangka baja yang akan menentukan jenis dari Jembatan Z. Jenis dari jembatan rangka baja dibedakan dengan bentuk komponen dari struktur jembatan. Tipe jembatan rangka baja ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 2.1 Tipe jembatan rangka baja
(Sumber: Abbas, 2020)

Struktur jembatan Z merupakan tipe jembatan rangka baja *warren truss*. Tipe tersebut merupakan jembatan yang berbentuk segitiga dengan konfigurasi geometri yang paling sederhana, dan setiap rangka mengalami gaya tarik dan tekan.

2.3.1 Non-Destructive Test pada Jembatan

Tujuan utama evaluasi jembatan adalah untuk menilai secara kuantitatif semua komponen struktur jembatan. Hasil pemeriksaan jembatan umumnya dicatat menggunakan peringkat kondisi untuk komponen atau elemen jembatan, serta catatan pendukung dan foto yang menggambarkan kondisi yang ditemukan selama inspeksi. Contohnya jika retakan ditemukan secara visual pada jembatan baja, tipe NDT lainnya dapat dilakukan agar menentukan sejauh mana kerusakan yang terjadi pada jembatan baja. NDT dapat meningkatkan keandalan inspeksi visual secara umum, dengan memberikan lebih banyak data kuantitatif tentang kerusakan yang terjadi atau dengan meningkatkan efektivitas dan keandalan pemeriksaan. Kerusakan kecil suatu struktur juga dapat ditemui dengan menggunakan NDT sehingga dapat diantisipasi dengan perbaikan atau rehabilitasi sebelum terjadinya kerusakan yang besar pada jembatan.

2.4 Non-destructive Test

Non-destructive test merupakan mekanisme yang digunakan oleh para insinyur untuk mendeteksi cacat atau kerusakan pada bahan dan struktur, baik saat kondisi manufaktur ataupun kondisi sebenarnya (*current state*). Ada beberapa tipe metode yang digunakan yaitu metode visual, *ultrasonic*, radiografik, *eddy current*, partikel magnetik, *penetrant*, *infrared*, dan lain-lain. Setiap tipe metode NDT yang ada, mempunyai kapabilitas dan limitasi. Dengan demikian penting untuk menentukan tipe NDT yang digunakan untuk menganalisis suatu struktur. Berikut merupakan tipe NDT yang akan dijelaskan berdasarkan kapabilitas dan limitasi (Smith, 2015).

Tabel 2.1 Jenis non-destructive test

No.	Jenis NDT	Kapabilitas	Limitasi
1	Metode Visual	Hampir semua komponen dapat diperiksa pada permukaan	Kerusakan pada bawah permukaan tidak akan terlihat
2	<i>Ultrasonic</i>	Penetrasi sangat baik ke dalam material yang memungkinkan pendeteksian cacat yang dalam (milimeter)	Seringkali sulit untuk menafsirkan sinyal yang cacat
3	<i>Radiographic</i>	Hampir semua komponen padat dapat dideteksi cacat dan memiliki kemampuan untuk mendeteksi cacat internal	Hanya dapat mendeteksi cacat yang berada pada orientasi tertentu dan mengalami kesulitan mendeteksi cacat yang sangat kecil
4	<i>Eddy current</i>	Pengujian dapat digunakan untuk mencari dan mengukur berbagai sifat fisik	Hanya dapat digunakan pada bahan yang menghantarkan listrik
5	Partikel Maknetik	Sangat sensitif untuk menentukan permukaan yang cacat dan hampir semua komponen baik dari ukuran dan bentuk dapat diuji	Hanya bagian feromagnetik yang dapat diuji dan untuk memastikan suatu bagian diuji sepenuhnya

Tabel 2.1 Jenis *non-destructive test* (Lanjutan)

6	<i>Penetrant</i>	Sangat serbaguna dan dapat digunakan untuk memeriksa logam dan non-logam	Tidak akan mendeteksi diskontinuitas di bawah permukaan
7	<i>Infrared</i>	Pengujian termal dapat dilakukan pada bahan seperti komposit yang mungkin sulit untuk diuji dengan tipe NDT lainnya	Untuk mengukur suhu komponen secara akurat, nilai emisivitas harus diketahui
8	<i>Vibration</i>	Mendeteksi kerusakan dan identifikasi kelainan yang terjadi pada material maupun struktur	Mengidentifikasi kerusakan secara global tidak bisa mengetahui kerusakan yang terjadi

(Sumber: diadaptasi dari “*Non-Destructive Testing (NDT) – Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods*” oleh Professor Robert A Smith, *The British Institute of Non-destructive testing*, hal 3-57. Hak cipta 2015 oleh BI NDT).

Pada penelitian ini NDT yang digunakan adalah *Vibration-based method* (VBM), VBM atau analisis getaran struktural yang biasanya didasarkan pada modal analisis dan evaluasi lebih lanjut akan diambil dari nilai frekuensi alami dan bentuk modal struktur yang diuji. VBM relatif lebih murah dibandingkan dengan tipe NDT yang disebutkan pada Tabel 2.1, secara bersamaan tidak terbatas pada kondisi laboratorium sehingga cukup efektif dalam mengevaluasi struktur jembatan (Katunin, 2019). Parameter modal analisis sering kali tidak efisien, terutama ketika ukuran kerusakan pada struktur relatif kecil. Kesulitan lain adalah struktur dalam keadaan baik tidak selalu tersedia untuk menjadi pembanding dengan simulasi yang dikerjakan.

2.5 Accelerometer

Accelerometer berguna untuk mengukur suatu getaran dari suatu material ataupun struktur. Sensor pada alat *accelerometer* akan mengamati getaran secara periodik. Hasil dari sensor tersebut dapat digunakan untuk menganalisis intensitas dan frekuensi getaran. *Accelerometer* dapat mengukur getaran pada satu, dua atau tiga sumbu. Accelerometer akan mengeluarkan data numerik akselerasi dari suatu struktur atau material. Nilai akselerasi tersebut akan diintegrasikan dan akan menghasilkan nilai lendutan yang baru dapat diolah lebih lanjut untuk mendapatkan nilai frekuensi natural dengan *fast fourier transform*.

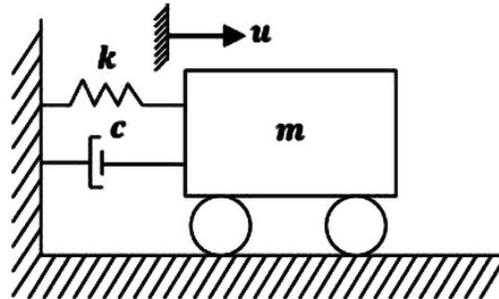
2.6 Degree of Freedom (DOF)

Degree of freedom atau derajat kebebasan dari suatu sistem suatu mekanis didefinisikan sebagai jumlah minimum variabel yang diperlukan untuk menggambarkan konfigurasi sistem secara lengkap (Bandyopadhyay, 2012). Untuk menentukan derajat kebebasan atau jumlah variabel yang nilainya dapat ditentukan secara independen, yaitu dengan menghitung jumlah variabel independen. Derajat kebebasan dalam penelitian adalah sistem *single degree of freedom* (SDOF). Pada kondisi sebenarnya struktur jembatan mempunyai DOF yang tidak terbatas karena massa beban sendiri dari struktur bersifat kontinu.

2.6.1 Single Degree of Freedom

SDOF merupakan sistem pergerakan hanya pada satu arah dari enam DOF secara keseluruhan. Arah yang ditinjau dari penelitian merupakan sumbu translasi tiga atau searah dengan gravitasi. SDOF memungkinkan sistem pergerakan hanya

bergerak pada satu arah. Model struktur dinamis SDOF dapat dilihat pada gambar dan rumus yang ditunjukkan sebagai berikut.



Gambar 2.2 Model *single degree of freedom*
(Sumber: Paz, 2018)

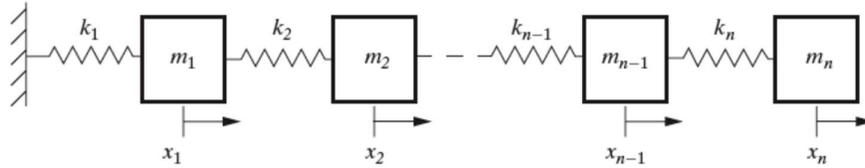
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P(t) \quad (2.1)$$

Dimana:

- m : Massa
- \ddot{u} : Percepatan
- c : *Damping*
- \dot{u} : Kecepatan
- k : Kekakuan
- u : Lendutan
- $P(t)$: Eksitasi gaya

2.6.2 *Multi Degree of Freedom*

Multi degree of freedom merupakan sistem yang membutuhkan dua atau lebih koordinat untuk menggambarkan pergerakan dari suatu sistem. Sistem ini berbeda dengan sistem kontinu, karena secara teoritis memiliki derajat kebebasan yang tidak terbatas. Akan tetapi dengan elemen hingga, sistem yang sebelumnya bersifat kontinu akan dibuat menjadi MDOF. Model struktur dinamis MDOF dapat dilihat pada gambar dan rumus yang ditunjukkan sebagai berikut.



**Gambar 2.3 Model multi degree of freedom
(Sumber: Paul, 2001)**

$$m_i \ddot{x}_i + k_i(x_i - x_{i-1}) - k_{i+1}(x_{i-1} - x_i) = 0 \quad (2.2)$$

$$M\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2.3)$$

2.7 Modal Analysis

Modal analisis merupakan pendekatan yang sangat kuat untuk memberikan pengukuran karakteristik dinamis suatu struktur tanpa asumsi analitis atau pemodelan analisis. Parameter modal analisis adalah fungsi massa, kekakuan, dan redaman. Waktu dan algoritma domain frekuensi sangat penting dalam melakukan modal analisis. Modal analisis memiliki keunggulan dibandingkan dengan pendekatan eksperimen lainnya. Modal analisis dapat mengukur langsung dari karakteristik sistem suatu struktur yang tidak dapat diperoleh dengan pengetesan lainnya. Jika modal analisis dirancang dengan baik, parameter seperti frekuensi, redaman, bentuk mode, dan frekuensi natural dari suatu struktur dapat diukur dalam frekuensi yang diinginkan. Dalam penilaian kondisi dan kerusakan suatu struktur, modal analisis sangat baik karena algoritma identifikasi kerusakan dan metode bergantung pada modal analisis.

2.8 Domain Waktu untuk Modal Analysis

Algoritma domain waktu sangat berguna untuk mendapatkan nilai *eigenvalues* dan *eigenvectors* dari suatu sistem. Algoritma ini sangat stabil secara numerik,

maka algoritma ini paling sering umum digunakan. Domain waktu dapat beroperasi pada *free decay responses* atau *unit impulse respons* (reaksi dari setiap sistem dinamis dalam menanggapi beberapa perubahan) (Avitabile, 2001).

Hal yang harus diperhatikan selama pengujian adalah menyelidiki *non-linear* dan *noise*, karena domain waktu sensitif terhadap respons *non-linear*. Selain itu, data harus konsisten, seperti frekuensi natural dari struktur tidak boleh bervariasi selama pengujian. Hal ini membuktikan bahwa perilaku struktural dipengaruhi oleh kondisi sekitar.

2.9 Domain Frekuensi untuk Modal Analysis

Pada dasarnya, domain waktu akan ditransformasikan ke domain frekuensi dengan *Fast Fourier Transform* (FFT). Algoritma domain frekuensi digunakan sebagai estimasi parameter berdasarkan pendekatan matematis yang digunakan pada domain waktu. Perbedaan mendasar antara domain waktu dengan domain frekuensi adalah domain frekuensi menggunakan respons frekuensi sedangkan domain waktu menggunakan fungsi respons *impuls*. Masalah kebocoran dari pengambilan data akan dihilangkan dalam algoritma domain frekuensi. Domain frekuensi lebih efisien dan secara numerik lebih stabil dibandingkan domain waktu. Perbedaan penting lainnya adalah domain waktu digunakan pita frekuensi luas dan model tinggi, sedangkan domain frekuensi lebih efisien dalam pita sempit (F.N & M., 2014).

2.10 Kekakuan

Untuk mengidentifikasi suatu kerusakan suatu struktur jembatan, kekakuan merupakan hal yang penting dikarenakan perubahan frekuensi suatu sistem

struktur terjadi karena kekakuan struktur yang berkurang. Banyak faktor yang memungkinkan kekakuan suatu struktur berkurang yaitu retakan, usia, korosi serta faktor lainnya. Secara umum kekakuan dipengaruhi oleh momen inersia, modulus elastisitas, serta konfigurasi dari struktur jembatan (Panjang bentang, luas penampang, dan momen inersia).

Pengetesan NDT VBM, memakai parameter modulus elastisitas sebagai penurunan kekakuan dari suatu sistem struktur. Hal ini diasumsi agar dapat mengetahui frekuensi natural kritis dari suatu sistem struktur. Semakin kecil modulus elastisitas pada sistem struktur, maka kekakuan akan semakin berkurang. Perhitungan kekakuan sistem struktur dapat dihitung dengan konfigurasi sistem struktur yaitu sendi-rol, kantilever serta sendi-sendi. Besaran kekakuan suatu struktur didapatkan dari nilai gaya yang dibagi dengan lendutan maksimum, maka rumus yang akan didapat adalah sebagai berikut:

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (2.4)$$

Dimana:

K : Kekakuan (N/mm)

P : Gaya (N)

δ : Lendutan (mm)

Untuk rumus kekakuan dan lendutan hanya bisa digunakan pada struktur balok sederhana, untuk menghitung kekakuan suatu struktur rangka jembatan bisa menggunakan rumus dan matriks sebagai berikut.

$$K = \Gamma^T K_e \Gamma \quad (2.5)$$

$$K = \frac{EA}{L} \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta & -\cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta & -\sin^2\theta \\ -\cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & -\sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Dimana:

E : Modulus Elastisitas

L : Panjang batang

A : Luas Penampang

θ : Sudut yang terjadi

Persamaan 2.5 dan persamaan 2.6 merupakan rumus untuk menghitung kekakuan pada batang local suatu struktur. Untuk mencari matriks kekakuan global didapatkan dari rumus sebagai berikut.

$$[K] = [K_1] + [K_2] + [K_{...}] + [K_n] \quad (2.7)$$

$$[K][u] = [F] \quad (2.8)$$

Dimana:

$[K]$: Matriks kekakuan global

$[u]$: Nilai lendutan

$[F]$: Gaya yang bekerja pada sistem

Persamaan 2.7 merupakan rumus yang digunakan untuk mencari matriks kekakuan global dari stuktur. Untuk mendapatkan lendutan dari stuktur didapatkan dari persamaan 2.8.

2.11 Frekuensi Natural

Setiap sistem struktur memiliki kecenderungan untuk bergetar pada frekuensi tertentu, frekuensi tersebut merupakan frekuensi natural atau *eigenvalue*. Setiap nilai frekuensi natural akan dikaitkan dengan bentuk dari sistem struktur tertentu,

yang disebut bentuk mode yang diasumsikan oleh model struktur yang bergetar pada frekuensi saat itu. Ketika suatu struktur di eksitasi dengan baik oleh beban, yang memiliki frekuensi yang bertepatan dengan salah satu frekuensi alami. Sistem struktur akan mengalami perpindahan dan tegangan yang besar, fenomena ini dikenal sebagai resonansi. Untuk sistem *un-damped* resonansi secara teoritis menyebabkan gerakan yang tak terbatas. Akan tetapi, damping membatasi respons struktur akibat beban resonansi. Frekuensi alami pada umumnya dipengaruhi oleh geometri jembatan serta batang dan tumpuan sistem struktur. Nilai frekuensi alami dipengaruhi oleh properti fisik dari struktur, yaitu massa dan kekakuan yang dimana ketika struktur menjadi lebih kompleks dengan penambahan derajat kebebasan, frekuensi natural dan mode getar. Jumlah frekuensi natural dan mode getar sejumlah dengan banyaknya derajat kebebasan. Frekuensi alami dianalisis untuk memeriksa model struktur dan membandingkannya dengan frekuensi yang diidentifikasi. Jika model struktur itu bergetar dengan frekuensi yang sama seperti frekuensi natural, maka amplitudo getaran akan meningkat secara signifikan. Hal ini berbahaya untuk struktur karena dapat merusak struktur pada jangka panjang, dengan demikian rumus frekuensi natural dapat ditunjukkan sebagai berikut.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.9)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \text{ dan } T_n = \frac{1}{f_n} \quad (2.10)$$

Dimana:

ω_n : Frekuensi natural (rad/sec)

k : Kekakuan

m : Massa

f_n : Frekuensi natural dalam Hz $\left(\frac{\omega_n}{2\pi}\right)$

T_n : Periode natural (sec)

2.12 *Fast Fourier Transform* (FFT)

Fast fourier transform merupakan algoritma untuk menghitung *discreate fourier transform* dengan cepat dan efisien. FFT sering digunakan untuk analisis kesalahan, kontrol kualitas, dan pemantauan kondisi dari material ataupun struktur (Burrus, Frigo, Johnson, Pueschel, & Selesnick, 2012). FFT juga berguna untuk menganalisis dan pengukuran terhadap sinyal getaran perolehan data dari *accelerometer*. Dari *accelerometer* akan menghasilkan data berdomain waktu. Pada dasarnya FFT mengubah data dari domain waktu ke domain frekuensi, dengan bantuan program untuk mendapatkan data sistem yang tidak terlihat secara langsung. Maka dari itu diperlukan mencari beberapa parameter seperti frekuensi natural dan damping rasio. Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk melakukan metode FFT pada getaran berbasis waktu. .

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-jf} dt \quad (2.11)$$

Dimana

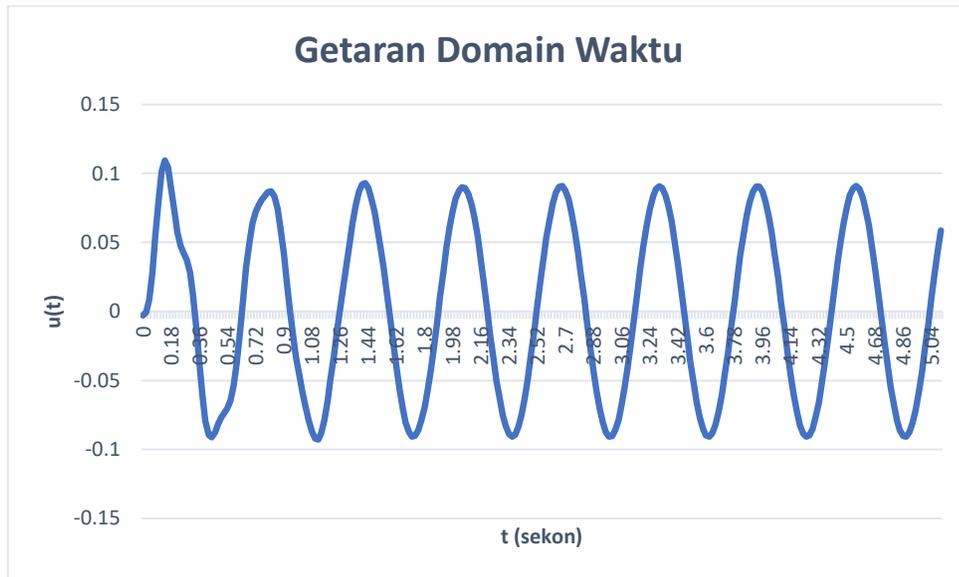
$S(f)$: Sinyal domain frekuensi

$s(t)$: Lendutan periode waktu tertentu

f : Frekuensi (*rad/sec*)

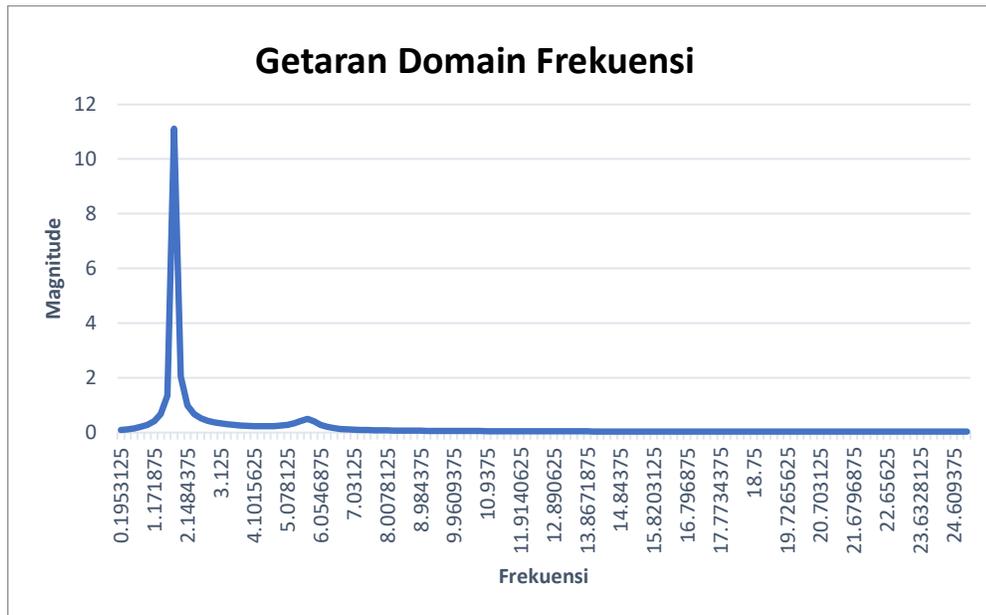
t : Periode (detik)

j : $\sqrt{-1}$



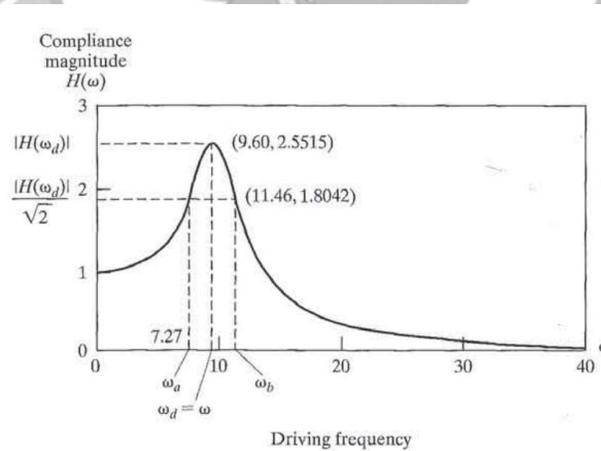
Gambar 2.4 Grafik Domain Waktu

Alat *accelerometer* akan mendapatkan suatu sinyal dalam domain waktu, kemudian data sinyal berdomain waktu akan ditransformasikan dalam domain frekuensi dengan *fast fourier transform*, dengan bantuan program untuk mendapatkan data sistem yang tidak terlihat secara langsung pada grafik domain waktu. Pada Gambar 2.3 dapat dilihat untuk menentukan nilai frekuensi natural dari struktur dapat terlihat pada puncak nilai dari frekuensi. Garis tersebut ditarik searah sumbu vertikal sehingga mendapatkan nilai frekuensi natural dalam satuan hertz (Hz).



Gambar 2.5 Grafik domain frekuensi

Grafik FFT dapat mendapatkan nilai dari rasio redaman dengan pendekatan metode *quadrature peak picking* untuk sistem SDOF. Metode pendekatan tersebut harus memiliki beberapa parameter seperti ilustrasi yang ditunjukkan pada gambar 2.4 adalah sebagai berikut.



Gambar 2.6 Metode *quadrature peak picking*
(Sumber: Inman, 2007)

Setelah mentransformasi data dari domain waktu ke domain frekuensi dan menghasilkan grafik FFT, maka akan terbentuk titik puncak pada grafik FFT.

Parameter yang harus dilihat dalam grafik FFT adalah rasio redaman suatu sistem struktur yaitu ω_d (nilai frekuensi pada puncak) serta ω_a dan ω_b yang merupakan nilai frekuensi pada puncak dibagi dengan akar dua. Kemudian rasio redaman struktur dapat dicari dengan parameter yang didapatkan pada grafik FFT dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_d} \quad (2.12)$$

Dimana:

ζ : *Damping ratio*

ω_d : Frekuensi nilai puncak grafik FFT

ω_a dan ω_b : Frekuensi nilai Puncak grafik FFT dibagi dengan akar dua

2.13 High Pass Filters

High pass filters adalah filter yang menghentikan sinyal frekuensi rendah yang lewat dan memungkinkan lewatnya dari sinyal frekuensi tinggi. Filter tersebut berfungsi secara berlawanan dengan *low pass filter*. Akan tetapi pada penelitian ini *high pass filters* dilakukan dengan menggunakan program MATLAB R2021b. Tujuan untuk melakukan *high pass filter* adalah untuk mengurangi *noise* yang ada pada data yang sudah diolah. Frekuensi natural berada pada sinyal frekuensi tinggi sehingga nilai frekuensi natural dari struktur tidak akan terganggu oleh filter tersebut.

2.14 Detrend

Detrend bertujuan untuk mengurangi rata-rata atau garis yang paling sesuai pada kuadrat terkecil dari data. Beberapa kolom data yang dihasilkan oleh alat dapat di olah secara terpisah. Menghapus *trend* dari data memungkinkan penelitian untuk memfokuskan analisis pada fluktuasi data pada *trend*. *Trend* linear biasanya menunjukkan peningkatan atau penurunan sistematis dalam data. Pergeseran sistematis dapat dihasilkan dari sensor yang menyimpang. Meskipun sering kali *trend* memiliki makna, beberapa jenis analisis menghasilkan hasil yang lebih baik setelah menghapus *trend* tersebut.

