

THEORETICAL ASSESSMENT OF BRIDGE STRUCTURAL INTEGRITY FROM
VIBRATION SIGNATURE ANALYSIS

MOHD ZAMRI BIN RAMLI
PM BADERUL HISHAM AHMAD
PROF. DR. AZLAN AB. RAHMAN

RESEARCH VOTE NO:

75180

Fakulti Kejuruteraan Awam
Universiti Teknologi Malaysia

2008

PENGHARGAAN

Pertamanya, Ketua Projek mengucapkan syukur kepada Ilahi kerana telah memberi rahmat dan kekuatan sehingga terlaksananya projek ini dengan jayanya. Ketua projek mengucapkan ribuan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam menjayakan projek dan laporan ini. Setinggi penghargaan kepada semua para penyelidik, pembantu penyelidik serta para pelajar yang terlibat secara langsung mahupun tidak dalam penghasilan laporan ilmiah ini. Disini juga Ketua Projek ingin merakamkan penghargaannya kepada pengurusan fakulti, RMC dan universiti kerana telah memberi pelbagai bentuk sokongan dari segi kewangan mahupun motivasi sehingga projek ini berjaya di dilaksanakan sepenuhnya. Akhir kata, ketua projek berharap agar hasil projek ini dapat dimanfaatkan sepenuhnya dalam kehidupan manusia sejagat.

ABSTRAK

Struktur kejuruteraan awam seperti menara, bangunan tinggi dan jambatan adalah terdedah kepada getaran. Getaran yang berlaku pada struktur akan menyebabkan kerosakan seperti retak dan jika berlaku dalam skala yang besar, boleh membawa kepada kegagalan struktur dan runtuh. Ia juga mendatangkan ketidakselesaan dan merbahaya kepada manusia. Untuk itu, tindak balas dinamik hendaklah ditentukan dan dikaji bagi meramal kelakuan struktur dibawah pengaruh getaran untuk mengelak terjadinya masalah seperti yang dinyatakan. Sejak akhir-akhir ini, pengawasan getaran pada struktur kejuruteraan awam yang melibatkan struktur seperti jambatan, bangunan dan empangan, semakin mendapat perhatian disebabkan kos penggunaan peralatan yang rendah dan kemajuan teknologi moden. Disamping itu, analisis dinamik juga dapat memberi maklumat penting tentang kelakuan dan keadaan untuk keseluruhan struktur. Kajian ini tertumpu kepada cara-cara bagaimana untuk memodelkan struktur jambatan untuk tujuan analisis dinamik. Objektif utama kajian ini pula adalah untuk menentukan frekuensi asli dan bentuk mod jambatan.

ABSTRACT

Almost civil engineering structure such as tower, tall buildings and bridges are exposed to vibration. Vibration occurrence on structure can lead to structural damage such as crack and if in large scale it may cause structure failure and collapse. It also can contribute to uncomfortable condition and threat safety to human. So the dynamic response of structure has to be measured and studied to predict the behaviour of structure under vibration to prevent such problems. Vibration monitoring for civil engineering (e.g. bridge, buildings, dams) has gained a lot of interest over the past few years, due to the cheap instrumentation and the development of modern technology. Besides, the dynamic analysis test result provides useful information on the behaviour and condition of the overall structure. This study concentrates on how to model a bridge structure to perform dynamic analysis. The main objective of this study is to determine the natural frequency and mode shape of bridge structure

KANDUNGAN

BAB	PERKARA	MUKA SURAT
	HALAMAN PENGESAHAN	i
	HALAMAN JUDUL	ii
	PENGHARGAAN	iii
	ABSTRAK	iv
	ABSTRACT	v
	KANDUNGAN	vi
	SENARAI RAJAH	xi
	SENARAI JADUAL	xiii
	SENARAI SIMBOL	xiv
	SENARAI LAMPIRAN	xvi
1	PENDAHULUAN	
	1.1 Objektif Kajian	2
	1.2 Skop Kajian	2
	1.3 Latar Belakang Kajian	3
	1.4 Metodologi	3

1.5	Hasil Jangkaan	5
2	KAJIAN LITERATUR	
2.0	Rumusan Journal	6
2.1	Forced Vibration Test of a Building With Semi-Active Damper System	7
2.2	Structural Vibration Control by Shape Alloy Damper.	7
2.3	Field Test of an Intelligent Stiffener For Bridges At The I-35 Walnut Creek Bridge	8
2.4	Dynamic Testing and System Identification of a Multi-Span Highway Bridge	9
2.5	Vibration Control Characteristic of a Hybrid Mass Damper System Installed in Tall Buildings	10
2.6	Damage Assessment Using Vibration Analysis on The Z24-Bridge	11
2.7	Static and Dynamic Testing of Bridges and Highways using Long-gage Fiber Bragg Grating Based Stain Sensors	12
2.8	Forced Vibration Testing Of The I-15 South Temple Bridge	13
3	LATAR BELAKANG TEORI	
3.1	Definisi getaran	15
3.1.1	Teori Getaran	16
3.1.2	Gerakan Harmonik Mudah	17
3.2	Profil Getaran	18

3.2.1	Amplitud	18
3.2.2	Tempoh	18
3.2.3	Peredam	19
3.2.4	Frekuensi	20
3.2.5	Mod	20
3.3	Frekuensi Asli dan Resonans	20
3.4	Punca-punca Getaran	21
3.5	Getaran Pada Jambatan	23
3.6	Ujian Dinamik Jambatan	26
3.6.1	Sumber Daya Cetusan	26
3.6.2	Jenis Ujian Dinamik	26
3.6.2.1	Ujian Getaran Persekitaran	27
3.6.2.2	Ujian Getaran Paksa	27
3.7	Kesan Getaran ke Atas Struktur Jambatan	29
3.8	Teori Getaran Bebas	29
3.8.1	Getaran Bebas Sistem Satu Darjah Kebebasan	29
3.8.2	Getaran Bebas Sistem Darjah Kebebasan Berbilang	31
3.9	Kaedah Unsur Terhingga	34
3.9.1	Pengenalan	34
3.10	<i>Modal Analysis</i>	36
3.11	Perisian Lusas 13.5	37
3.12	Alatan Untuk Ujian Dinamik	37
3.12.1	<i>Accelerometer</i>	39
3.12.2	Alat Capaian Data	40
3.12.3	<i>Shaker</i>	41
3.12.4	<i>Impact Hammer</i>	41

4 MEMODEL STRUKTUR

4.1	Pengenalan	43
4.1.1	Memodel Struktur	44
4.1.2	Latar Belakang Struktur	44
4.2	Jenis Elemen	46
4.2.1	Elemen Thick Beam	46
4.2.2	Elemen Thick Shell	48
4.3	Sifat Keratan dan Dimensi	49
4.4	Sifat Bahan	50
4.5	Model Unsur Terhingga	51
4.6	Pembebanan dan Keadaan Sempadan	51

5 ANALISIS DATA DAN KEPUTUSAN

5.1	Pengenalan	52
5.1.1	Kedudukan Nod Pada Model	53
5.2	Frekuensi Asli dan Bentuk Mod	54
5.3	Perbandingan Frekuensi Antara Model Berlainan Saiz Elemen	61
5.4	Ujian <i>Impact Hammer</i> Pada Rasuk Konkrit	62
5.4.1	Metodologi Ujian di Makmal	63
5.4.2	Analisis Unsur Terhingga	65

6 KESIMPULAN DAN CADANGAN

6.1	Kesimpulan	68
6.2	Cadangan	69
6.3	Sumbangan Kajian	70

RUJUKAN	71
APPENDIKS A	
LAMPIRAN	76

SENARAI RAJAH

NO RAJAH	TAJUK	MUKA SURAT
1.1	Carta Metodologi	4
3.1	Sistem Spring Berjisim (Getaran Bebas)	16
3.2	Sistem Spring Berjisim (Getaran Paksa)	17
3.3	Gerakan Harmonik Mudah	18
3.4	Profil Getaran	18
3.5	Gerakan Hamoni Peredam	19
3.6.1	Tacoma Bridge Bergetar	21
3.6.2	Tacoma Bridge Runtuh	21
3.7	Pengaruh Anggota Sampingan Terhadap Kekukuhan Jambatan	24
3.8	<i>Impact Testing</i>	28
3.9	<i>Shaker Testing</i>	28
3.10	Spring Berjisim (satu darjah kebebasan)	29
3.11	Spring Berjisim (dua darjah kebebasan)	31
3.12	Struktur Terlanjar	34
3.13.1	Struktur Terlanjar Tak Terhingga	35
3.13.2	Struktur Terlanjar Terhingga Dengan Elemen Segitiga	35
3.13.3	Struktur Terlanjar Terhingga dengan Elemen Segiempat	35
3.14	<i>Accelerometer</i>	39
3.15	Alat Capaian Data	40
3.16	<i>Shaker</i>	41

3.17	<i>Impact Hammer</i>	41
4.1	Pandangan Sisi Jambatan	44
4.2	Pandangan Hadapan Jambatan	45
4.3	Elemen <i>Thick Beam</i>	46
4.4	Elemen <i>Thick Shell</i>	48
5.1	Kedudukan Nod Pada Rasuk Jambatan	53
5.2	Kedudukan Nod Pada Deck Jambatan	53
5.2.1	Bentuk Mod 1	55
5.2.2	Bentuk Mod 2	55
5.2.3	Bentuk Mod 3	56
5.2.4	Bentuk Mod 4	56
5.2.5	Bentuk Mod 5	57
5.2.6	Bentuk Mod 6	57
5.2.7	Bentuk Mod 7	58
5.2.8	Bentuk Mod 8	58
5.2.9	Bentuk Mod 9	59
5.2.10	Bentuk Mod 10	59
5.3	Pembahagian Elemen Kecil (<i>fine mesh</i>)	61
5.4	Pembahagian Rasuk	63
5.5	Rasuk Konkrit, <i>Impact Hammer</i> dan <i>Accelerometer</i>	64
5.5	Rasuk Diletak Di Atas Span	64

SENARAI JADUAL

NO JADUAL	TAJUK	MUKA SURAT
4.1	Dimensi Dan Sifat Keratan <i>I-Beam</i> Dan <i>RHS</i>	49
4.2	Sifat Keluli	50
4.3	Sifat Kayu	50
5.1	Frekuensi Asli Dan Bentuk Mod Model Jambatan	54
5.2	Perbandingan Frekuensi Asli Berlainan Saiz Elemen (<i>Finer Mesh vs Coarse Mesh</i>)	62
5.3	Sifat-sifat Bahan Konkrit	65
5.4	Perbandingan Frekuensi Asli Antara Ujian Di Makmal Dan Analisis Dengan LUSAS 13.5	66

SENARAI SIMBOL

f	-	Daya
m	-	Jisim
g	-	Pecutan graviti
v	-	Halaju
A	-	Pecutan
δ	-	Anjakan sistem spring
x	-	Anjakan sistem spring
\dot{x}	-	Halaju gerakan sistem spring
\ddot{x}	-	Pecutan gerakan sistem spring
k	-	Kekukuhan spring
$P_n(t)$	-	Daya paksa pada spring ($= 0$)
X_n	-	Amplitud getaran sistem spring
$[M]$	-	Matriks jisim bagi struktur
$[C]$	-	Matriks peredam bagi struktur
$[K]$	-	Matriks kekukuhan struktur
$\{x\}$	-	Vektor anjakan bagi nod
$\{\dot{x}\}$	-	Vektor halaju bagi nod
$\{\ddot{x}\}$	-	Vektor pecutan bagi nod
$\{F\}$	-	Vektor daya pada nod
t	-	Masa
T	-	Tempoh getaran
f	-	Frekuensi getaran
$\{\omega\}$	-	Frekuensi Asli

A'	-	Amplitud Getaran
α	-	Sudut fasa
λ	-	Nilai eigen / <i>eigenvalue</i>

SENARAI LAMPIRAN

NO	TAJUK	MUKA SURAT
1.	Perbezaan antara beban angin dan gempabumi	76
2.	Pelan Jambatan UTM Yang Dikaji	77
3.	Komponen Jambatan	78
4.	Butir-butir Struktur Pada Jambatan	79
5.	<i>Impact Hammer Test</i>	80
6.	Saiz dan Dimensi Rasuk Konkrit	81
7.	Keputusan Analisis Bagi 10 Mod Rasuk	81

BAB 1

PENDAHULUAN

Pemahaman terhadap getaran struktur bangunan dan keupayaannya menjadi semakin penting untuk diambil kira dalam pembinaan. Kemajuan dalam teknologi bahan binaan dan analisis menjadikan pembinaan struktur yang unik menjadi semakin tidak mustahil. Pembinaan struktur bangunan yang tinggi, bangunan yang mempunyai bingkai langsing tetapi mempunyai kekuatan yang tinggi dan jambatan memerlukan rentang yang lebih panjang. Pada masa kini, pembinaan menara, pelantar, dan sebagainya lebih tertumpu di kawasan yang kritikal. Penambahan beban lalulintas dan kepadatan lalulintas juga penyumbang kepada kemajuan teknologi getaran.

Dengan kemajuan dalam merekabentuk sesuatu struktur, penggunaan bahan-bahan yang ringan dan kuat semakin bertambah. Maka struktur-struktur moden adalah mudah dipengaruhi oleh getaran. Sebagai contohnya, bangunan dan jambatan era ini adalah lebih ringan, fleksibel, besar dan tinggi terdedah kepada ancaman getaran. Akibatnya struktur yang dibina akan menyebabkan ketidakselesaan kepada pengguna. Oleh itu, para jurutera hendaklah mengambilkira fenomena getaran ini dalam pembinaan struktur. Maka kajian berkenaan dengan getaran perlu dijalankan untuk mendapatkan maklumat yang lebih lanjut tentangnya. Oleh sebab itu, getaran terhadap struktur binaan diutamakan semasa merekabentuk bangunan lebih daripada

sebelumnya. Kehendak semasa dan pengaruh persekitaran menyebabkan kajian terhadap getaran dimajukan dari semasa ke semasa.

1.1 Objektif Kajian

Objektif kajian ini adalah:

- i. Mengenalpasti parameter-parameter dan ciri-ciri yang terlibat dalam menentukan kesan getaran dalam struktur jambatan.
- ii. Mencadangkan prosedur instrumentasi untuk mengukur kesan getaran terhadap di dalam beberapa kajian kes.
- iii. Membina model analisis unsur terhingga bagi struktur jambatan untuk analisis tindakbalas dinamik.

1.2 Skop Kajian

Kajian ini melibatkan model teori untuk beberapa struktur jambatan terpilih berdasarkan data permulaan daripada analisis kesan getaran. Selain itu, terdapat juga pengukuran asas bagi kesan getaran terhadap jambatan. Analisis unsur terhingga digunakan terhadap model jambatan yang dikenakan getaran ambien. Disamping itu, keperluan asas instrumentasi dinamik akan ditentukan.

1.3 Latar Belakang Kajian

Undang-undang telah menetapkan bahawa jambatan yang telah tua dan berisiko tinggi mestilah selalu dilakukan pemeriksaan. Teknik pemeriksaan terkini adalah bergantung terhadap sifat manusia untuk mengenali ketidaksempurnaan struktur. Ternyata bahawa teknik pemeriksaan ini harus dipertingkatkan. Kajian terbaru adalah mengkaji kebolehan penilaian keseluruhan struktur jambatan melalui pengawalan getaran. Ketidaksempurnaan struktur di dalam janakuasa nuklear dan struktur kejuruteraan laut biasanya dikesan menggunakan penilaian ciri-ciri dinamik. Oleh kerana, jambatan juga mempunyai beban dinamik maka kaedah ini amat sesuai digunakan. Jambatan dan kejuruteraan mekanikal telah membangunkan kaedah ujian tanpa musnah untuk membuat penilaian terhadap struktur dan komponen. Ini adalah berdasarkan ujian getaran ambien yang dikenali sebagai “Kesan Getaran” ke atas struktur yang dapat menentukan kawasan berlakunya kelemahan dan kerosakan. Setiap struktur mempunyai bentuk-bentuk tertentu kelakuan dinamik yang berdasarkan kesan terhadap getaran. Perubahan di dalam struktur seperti semua bentuk kerosakan akan meningkat dengan pertambahan beban ditanggung yang memberi kesan terhadap tindak balas dinamik. Cadangan ini menggunakan ciri-ciri tindakbalas dinamik untuk membuat penilaian terhadap keseluruhan struktur.

1.4 Metodologi

- i. Mengenalpasti keperluan teknikal bagi rekabentuk alatan jambatan untuk pengukuran tindakbalas getaran.
- ii. Membuat analisis model untuk pengukuran asas bagi kesan getaran.
- iii. Membina model analisis unsur sehingga bagi struktur jambatan untuk analisis tindakbalas dinamik.

iv. Menganalisis bentuk mod dan parameter tindakbalas getaran.

Mengenalpasti keperluan teknikal bagi rekabentuk alatan jambatan untuk pengukuran tindakbalas getaran.

- Tentukan masalah kajian berdasarkan pembacaan, perbincangan dan pemerhatian terhadap perkara yang berkaitan.
- Tentukan objektif dan skop kajian.
- Fahami dan kenalpasti latar belakang kajian
- Kaji kebolehan dan keperluan untuk menghasilkan model seperti bahan yang digunakan, saiz struktur, konfigurasi struktur, had-had seperti ricih momen lentur, momen puntiran dan pesongan maksimum.

Membuat analisis model untuk pengukuran asas bagi kesan getaran.

- Fahami teori asas dinamik struktur.
- Tentukan perubahan yang akan berlaku terhadap ciri-ciri dinamik akibat getaran yang dikenakan.
- Tentukan kaedah analisis untuk mendapatkan ciri-ciri dinamik.

Membina model analisis unsur terhingga bagi struktur jambatan untuk analisis tindakbalas dinamik.

- Bina model permulaan untuk membuat rangka kerja kajian
- Pertingkatkan model dengan memeriksa menggunakan analisis statik dan dinamik.
- Bina model unsur terhingga (SAP2000) untuk struktur jambatan contoh dan juga yang sebenar.

Menganalisis bentuk mod dan parameter tindakbalas getaran.

- Bincang hasil keputusan frekuensi tabii dan bentuk mod berdasarkan teori analisis dan analisis unsur terhingga.
- Bincangkan kesimpulan kajian.
- Memberi cadangan untuk kajian akan datang

1.5 Hasil Jangkaan/Faedah

Kajian ini dijangka akan menghasilkan kaedah prosedur alatan untuk tujuan mengukur kesan dinamik ke atas jambatan dan model teori terhadap struktur untuk menilai tindakbalas dinamik. Kaedah ini amat berguna untuk penyelenggaraan ataupun sebagai penilaian jurutera untuk pengawalan keadaan struktur jambatan menggunakan teknik getaran.

BAB 2

KAJIAN LITERATUR

Kajian ini adalah mengenai penilaian teori terhadap struktur jambatan menggunakan analisis tanda-tanda getaran. Pengawalan terhadap getaran telah dijadikan satu teknik tanpa musnah mengenalpasti kerosakan ataupun perubahan dalam ciri-ciri dinamik sesuatu struktur. Ujian getaran akan mengenalpasti perubahan bentuk mod dan frekuensi tabii. Ramalan awal kerosakan akan terjadi berdasarkan pengurangan nilai kekukuhan di dalam struktur. Terdapat beberapa penulisan journal telah dibuat kajian literatur berkaitan dengan tajuk kajian ini.

2.0 Rumusan Journal

2.1 Forced Vibration Test of a Building With Semi-Active Damper System.

Menurut N. Kurata, *et al* (2000), kajian satu ujian getaran telah dilakukan ke atas satu bangunan dengan menggunakan Hidraulik Separa Aktif Teredam (SHD). Ujian ini dilakukan untuk mengenal pasti dan mengawal tindakbalas struktur bangunan sekiranya berlaku kejadian gempa bumi yang besar. Ujian Getaran Daya dilakukan menggunakan daya maksimum sebanyak 1000kN dan 70W kuasa elektrik untuk menyelidik ciri-ciri getaran bangunan dan menentukan prestasi sistem tersebut. Kaedah pengawalan dilakukan menggunakan persamaan kuadratik linear. Kajian dilaksanakan terhadap bangunan pejabat lima tingkat daripada besi keluli tersebut dipasang sistem separa aktif teredam terletak di Shizuoka City, Japan. Sebanyak lapan buah Hidraulik Separa Aktif Teredam (SHD) dipasang diantara pengikat besi dan rasuk, pengimbas halaju dipasang pada setiap aras dan sebuah komputer di dalam bilik kawalan pada aras satu. Pengimbas akan mengukur tindakbalas bangunan, kemudian komputer akan mengira daya teredam untuk memenimakan tindakbalas berdasarkan data manakala Hidraulik Separa Aktif Teredam (SHD) pula akan menghasilkan daya teredam berdasarkan arahan komputer. Hasil keputusan apabila Hidraulik Separa Aktif Teredam (SHD) tidak bergabung didapati nilai frekuensi resonan awal dan nisbah teredam menurun dengan pertambahan daya. Apabila Hidraulik Separa Aktif Teredam (SHD) bergabung didapati prestasi sistem dapat mengenalpasti berdasarkan ujian pengawalan tindakbalas terhadap getaran terkawal.

2.2 Structural Vibration Control by Shape Alloy Damper.

Menurut Y.L. Han *et al* (2003), satu alat teredam dibina berdasarkan dawai Bentuk Memori Aloji (SMA) dengan tujuan untuk mengawal tindakbalas struktur. Dawai Bentuk Memori Aloji (SMA) digunakan biasanya dalam bidang sains perubatan, elektrik, angkasa lepas dan kejuruteraan mekanikal. Dalam kajian ini,

perkara pertama adalah membincangkan prinsip dawai Bentuk Memori Aloi (SMA) dan kemudian alat teredam yang dibina dari dawai tersebut untuk pengawalan struktur. Ketiga, sebanyak lapan buah alat teredam dipasang pada kerangka struktur besi setinggi 2m bagi memastikan penggunaan alat teredam efektif. Kaedah unsur terhingga digunakan bagi menganalisis getaran bebas dan getaran daya pada kerangka terkawal dan kerangka tak terkawal. Hasil keputusan menunjukkan bahawa getaran yang terhasil oleh alat teredam Bentuk Memori Aloi (SMA) pada kerangka terkawal adalah lebih laju berbanding pada kerangka tak terkawal. Hasil kajian dan pengiraan menunjukkan alat teredam Bentuk Memori Aloi (SMA) adalah efektif untuk mengurangkan tindakbalas struktur dan berpotensi sebagai alat menyerap tenaga disamping kawalan yang baik terhadap daya dan had jangkahayat.

2.3 Field Test of an Intelligent Stiffener For Bridges At The I-35 Walnut Creek Bridge

Menurut W.N. Patten, *et al* (1999), kajian ini menerangkan mengenai kaedah baru untuk pengawalan struktur jambatan menggunakan sistem separa aktif hidraulik boleh laras. Sistem ini diuji selama dua tahun menggunakan tenaga bateri automatik 12Volt. Kaedah teknologi baru menggunakan Intelligent Stiffener for Bridges (ISB) dipasang kepada jambatan sedia ada untuk menambah jangka hayat struktur jambatan. Pengukuh ini unik kerana terdapat perangkai hidraulik boleh laras untuk mengukuhkan pengukuh dan alat teredam semasa kenderaan melalui jambatan. Ujian ini telah dilakukan ke atas jambatan Walnut Creek yang terletak di Purcell, Oklahoma yang telah dibina pada tahun 1971 dan digunakan pada tahun 1972. Kadar lalulintas adalah 18,000 kenderaan sehari dan melibatkan 3100 kenderaan berat. Jambatan ini dipilih kerana jambatan yang besar dan telah dapat dikesan secara visual lenturan apabila kenderaan berat melaluinya. Jambatan ini mempunyai alat disphgram yang akan menghasilkan Model Analisis Terhingga untuk keseluruhan struktur. Untuk membuat model analitik, ujian dijalankan menggunakan penukul yang kepalanya seberat 160kg dan dijatuh bebas setinggi 1.9m menghasilkan 11,350kg

daya impuls. Penukul dijatuhkan sebanyak empat kali di enam lokasi berlainan dan hasilnya dicatat oleh tiga puluh enam *accelerometers*. Seterusnya data ujian akan dapat menghasilkan model frekuensi dan bentuk mod. Kemudian ujian dijalankan dengan meletakkan Intelligent Stiffener for Bridges (ISB). Hasil keputusan didapati alat teredam mempunyai kesan yang lebih kecil terhadap terikan maksimum tetapi baki getaran puncak menurun sebanyak 50% apabila kenderaan berat melepasi jambatan.

2.4 Dynamic Testing and System Identification of a Multi-Span Highway Bridge

Menurut C.S. Huang, *et al* (1999), ujian dilaksanakan di tapak adalah untuk menentukan ciri-ciri dinamik system struktur termasuklah frekuensi tabii, bentuk mod dan nisbah teredam. Jambatan yang akan dibuat kajian adalah Jambatan Yuan-Shan yang terletak 27m tinggi dari aras tanah dan mempunyai jarak rentang 95m, 155m dan 110m. Parameter struktur ini berguna bagi menilai semula rekabentuk sebenar, kawalan aktif, perbandingan dengan model analitik dan juga untuk penilaian kerosakan. Terdapat berbagai jenis ujian di tapak yang boleh dijalankan seperti ujian getaran ambien, ujian getaran bebas dan ujian getaran daya. Hasil ujian getaran bebas dan ujian getaran daya adalah lebih baik berbanding ujian getaran ambien kerana data input yang stabil. Dalam kajian ini, ujian getaran bebas dan ujian getaran ambien bersama dengan kenderaan berat bagi menghasilkan daya impuls telah dilakukan bagi mengenalpasti ciri-ciri dinamik Jambatan Lebuh raya Pelbagai Rentang. Ujian getaran bebas dibuat dengan menghasilkan daya impuls menggunakan kenderaan berat 14 tan. Sebanyak tujuh pengimbas sensitif telah diletakkan untuk mengukur tindakbalas getaran bebas. Isyarat pengimbas analog akan ditukar kepada data digital dan seterusnya akan dicatat oleh komputer pangkalan data. Sebanyak empat belas bentuk mod telah didapati sepanjang ujian dilaksanakan. Bagi ujian getaran ambien cara pelaksanaan adalah seperti ujian getaran bebas. Setiap pengukuran, tindakbalas jambatan dicatat untuk tempoh selama tujuh minit dengan

kadar 50Hz. Data halaju akan diproses menggunakan teknik *Randomdec (random decrement)* dan teknik *Ibrahim time-domain identification (ITD)*. Kemudian teknik ITD akan menghasilkan frekuensi tabii, bentuk mod dan model nisbah teredam daripada data ujian getaran bebas. Akhirnya, hasil daripada frekuensi tabii dan ubah bentuk yang telah dikenalpasti dari kedua-dua ujian di buat perbandingan menggunakan analisis unsur terhingga pakej SAP90 keatas jambatan yang mempinyai 6 darjah kebebasan. Perbandingan ini telah menghasilkan model unsur terhingga terdapat persamaan bentuk untuk empat bentuk terawal ujian. Tetapi untuk tujuh belas bentuk lagi daripada model unsur terhingga didapati tidak tepat dengan hasil kajian. Ini menunjukkan bahawa model unsur terhingga yang digunakan untuk rekabentuk struktur memerlukan penilaian terhadap keadaan batasan, geometri, ciri-ciri bahan jambatan

2.5 Vibration Control Characteristic of a Hybrid Mass Damper System Installed in Tall Buildings

Menurut T. Saito, *et al* (2001), satu sistem yang dikenali sebagai *Hybrid Mass damper (HMD)* telah dibangunkan untuk mengurangkan tindakbalas bangunan terhadap angin kuat dan juga gempabumi ke tahap yang kekuatan sederhana. Terdapat dua HMD dipasang aras atas bangunan yang dipilih untuk melihat kesan getaran puntiran. Dua bangunan tinggi telah dipilih, bangunan yang pertama terletak di Osaka, Jepun mempunyai 50 tingkat tinggi yang terdiri dari kerangka besi. Ciri-ciri dinamik dapat dikenal pasti menggunakan ujian getaran daya menggunakan sistem HMD. Dua jenis HMD dipasang di tingkat atas bangunan dengan tujuan memperbaiki keselesaan penghuni bangunan semasa angin kuat dan gempabumi. Satu lagi bangunan yang dibuat kajian adalah bangunan setinggi 43 tingkat terdiri daripada kerangka besi yang terletak di Miyazaki Prefecture, Jepun. Ciri-ciri dinamik bangunan itu ditentukan menggunakan dua kaedah iaitu ujian getaran dan menganalisis catatan tindakbalas gempabumi bangunan tersebut. Sebagai hasil dari kajian, bagi bangunan 50 tingkat ujian getaran daya dilakukan berserta dengan sistem

HMD dilaksanakan bagi mengenalpasti ciri-ciri bangunan. Dengan mengarahkan ujian getaran bebas telah didapati sistem HMD ini dapat mengurangkan getaran didalam bangunan. Manakala bagi bangunan 43 tingkat melalui analisis ujian getaran dan juga pemerhatian gempabumi didapati bangunan ini menghasilkan satu perubahan bentuk dan juga satu atau dua bentuk puntiran. Melalui kedua-dua analisis sistem HMD keatas bangunan, didapati sistem ini berkesan untuk mengurangkan tindakbalas bangunan terhadap angin kuat dan juga gempabumi.

2.6 Damage Assessment Using Vibration Analysis on The Z24-Bridge

Menurut J. Maeck, *et al* (2003), pengawalan getaran amat berguna sebagai alat penilai dalam pembangunan teknik mengenalpasti kerosakan tanpa musnah. Selain itu, ia juga dapat membuktikan kerosakan yang berlaku di dalam sistem sesuatu struktur adalah disebabkan oleh perubahan ciri-ciri dinamik. Pengawalan getaran ini dapat menentukan maklumat keseluruhan sruktur disamping lokasi kerosakan. Ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan ferkuensi eigen dan bentuk mod serta ciri-ciri dinamik keatas bentuk kerosakan sruktur tersebut. Kaedah ini dinamakan penentuan terus kekukuhan. Teknik ini menggunakan pengiraan model momen lentur dan kelenkungan untuk mengira nilai kekukuhan kelenturan di setiap lokasi. Anggapan asas bahawa kerosakan akan bersalingkait dengan pengurangan nilai kekukuhan struktur. Teknik penilaian kerosakan ini telah dijalankan untuk menentukan kerosakan di dalam konkrit pra tegangan bagi Jambatan Z24 di Canton Bern, Switzerland yang menghubungkan Koppigen dan Utzenstorf. Jambatan ini mempunyai tiga rentang, dua laluan dan sepanjang 60m. Di dalam rangka kerja oleh Brite Euram untuk projek BE96-3157, sistem mengenalpasti untuk mengawal keadaan sruktur kejuruteraan awam (SIMCES), teknik ke atas jambatan tersebut adalah untuk mengenalpasti dan mengapiliasi kerosakan. Beberapa ujian kerosakan dilaksanakan dan menghasilkan lapan senario kerosakan. Satu siri pengiraan penuh model telah dibuat kepada jambatan tersebut sebelum dan selepas beberapa senario kerosakan berlaku. Untuk mengetahui momen lentur dalaman jambatan satu analisis

dibuat menggunakan model rasuk ANSYS. Dalam sistem analisis ini tindakbalas daya dan daya dalaman didapati adalah bergantung kepada kekukuhan struktur. Bagi pengiraan bentuk mod menggunakan kaedah Mindlin dan untuk mengira kelengkungan menggunakan MATLAB. Pengiraan terus kekukuhan untuk senario kerosakan akan dibandingkan dengan senario sebelum berlaku kerosakan. Seterusnya, nilai kekukuhan lenturan dari analisis model unsur terhingga ANSYS jambatan tanpa kerosakan di ambil. Hasil kajian didapati kerosakan yang didapati dapat dilihat secara jelas dan berlaku enapan sebanyak 80mm sehingga 95mm. Persamaan frekuensi eigen adalah model anjakan dan berguna sebagai penanda kerosakan berdasarkan ujian ini. Kesimpulannya, pengiraan terus kekukuhan adalah kaedah terbaru yang berkesan untuk mengenalpasti kerosakan sesuatu struktur.

2.7 Static and Dynamic Testing of Bridges and Highways using Long-gage Fiber Bragg Grating Based Stain Sensors

Menurut W.L. Schulz, *et al* (2000), kekisi fiber optik Bragg adalah satu *gage* yang panjang yang digunakan untuk mengukur keterikan statik dan dinamik di dalam sesuatu struktur dan juga model struktur bagi kawalan keadaan struktur dan ramalan kerosakan semasa kejadian gempa bumi. Kaedah ini di buat kerana terdapat perbezaan bagi model analitik ramalan tindak balas struktur terhadap gempa bumi berbanding dengan keadaan kerosakan struktur di makmal dan juga di tempat kejadian sebenar. Oleh itu, pengimbas panjang *gage* ini di buat kajian untuk membuktikan keberkesanan model analitik penilaian pra-gempabumi berdasarkan analisis sistem kenalpasti. Fiber optik ini dapat mencatatkan dan mengawal struktur dengan cara mengetahui tahap tindak balas struktur terhadap gempa bumi dan juga sebagai teknik penilaian kerosakan gempa bumi tanpa musnah berdasarkan analisis tanda dinamik. Model analitik yang digunakan memerlukan pengukuran terikan dinamik untuk membuktikan kajian. Kekisi fiber berkelajuan tinggi ini dibina untuk mengukur terikan daripada arus terus sehingga 1kHz. Kajian ini telah dilakukan sebagai kawalan ke atas struktur jambatan HorseTail Falls, Oregon selama dua tahun.

Terdapat 26 pengimbas dipasang pada jambatan tersebut. Beberapa ujian dinamik dilakukan untuk melihat prestasi jambatan tersebut antara imbasan perubahan laju berdasarkan keadaan lalulintas. Ini dapat menunjukkan resolusi kurang daripada 0.1 mikroterikan. Pada Julai 2004, sebanyak empat belas *gage* dipasang pada jambatan yang lain di Oregon untuk menilai kerosakan jambatan tersebut terhadap gempa. Jambatan tersebut dijangka akan musnah dalam 3-5 tahun lagi. Daya kerosakan akan dikawal oleh pengimbas dan akan dibandingkan dengan model analitik. Model analitik kerosakan gempa menggunakan ujian getaran bebas dan ujian getaran daya. Ujian getaran bebas dibuat menggunakan rasuk aluminium sepanjang 100cm yang dipasang tiga pengimbas untuk mengukur terikan makro. Nilai terikan ini akan dibandingkan dengan model analitik dan kemudian diuji dengan getaran daya. Model analitik berkebolehan meramalkan kawasan berlaku kerosakan berdasarkan analisis tanda-tanda dinamik iaitu semasa ujian kerosakan akan mengurangkan luas kawasan rentas. Kaedah terbaru ini adalah teknologi yang diaplikasi untuk keadaan struktur semasa berlaku gempa sebenar.

2.8 Forced Vibration Testing Of The I-15 South Temple Bridge

Menurut K.C. Womack, *et al* (1999), kajian ini dilakukan untuk mengetahui potensi penggunaan sistem pengenalpastian sebagai teknik penilaian ujian tanpa musnah. Kajian ini telah memilih jambatan sembilan rentang I-15 diatas South Temple Street yang sepanjang 188.76m dan lebar 18.28m. Kajian ini dilakukan dalam dua fasa, yang pertama adalah sistem mengenalpasti jambatan struktur besar, pelbagai darjah kebebasan dan pelbagai rentang. Bagi ujian jambatan sembilan rentang terdapat lima bentuk tindak balas dan frekuensi rendah telah ditentukan dan menunjukkan keadaan struktur jambatan. Perubahan frekuensi tabii untuk setiap keadaan menunjukkan keadaan terbaru jambatan. Manakala fasa kedua, kajian getaran daya terhadap jambatan rentang disokong mudah setelah berlaku peletupan jambatan. Rentang di sokong mudah ini diuji dengan tujuh keadaan termasuk ujian pra-kerosakan. Ujian ini dilakukan menggunakan pengoncang berjirim berpusat dan

tindakbalas struktur jambatan ini diukur oleh *accelerometer* dan dianalisis oleh komputer bagi mendapatkan frekuensi tabii dan bentuk mod. Kerosakan biasanya disebabkan oleh pengurangan kekukuhan didalam struktur, jisim, peredam yang akan meyebabkan perubahan frekuensi tabii, bentuk mod dan model peredam. Kajian ini dapat membuktikan sistem pengenalpastian ini (analisis model) mempunyai potensi sebagai kaedah penilaian tanpa musnah untuk menentukan kesempurnaan struktur.

BAB III

LATAR BELAKANG TEORI

3.1 Getaran

i. J.R Maguire dan T.A Wyatt

....getaran menghasilkan gema yang terlalu bahaya untuk struktur binaan. Gema tidak dapat dihapuskan tetapi boleh diminimumkan dengan cara pengawalan terhadap punca-punca getaran...

ii. H.A. Buchholdt

....komponen daya denyutan yang mempunyai frekuensi yang sama dengan frekuensi struktur bangunan akan menyebabkan struktur itu bergetar kepada amplitud yang tinggi...

iii. R J Steffens

....getaran yang terhasil daripada bermacam-macam sumber boleh menyebabkan gangguan atau ketidakselesaan. Ianya terlibat secara sedikit dalam kerosakan bangunan atau kecederaan...

iv. Daniel J. Inman

....getaran merupakan kajian tentang gerakan yang berulang-ulang sesuatu objek pada satu kedudukan atau titik rujukan...

3.1.1 Teori Getaran

Getaran adalah gerakan atau ayunan suatu jasad dari kedudukan rehatnya. Getaran berlaku apabila terdapat satu daya yang mengganggu kedudukan rehat sesuatu jasad. Getaran boleh dibahagikan kepada beberapa jenis iaitu

a. Getaran Bebas

Pertimbangkan sistem yang terdiri daripada sebuah jasad berjisim yang digantung pada spring. Jika sistem ini ditarik pada jarak yang tertentu dan kemudian dilepaskan, daya dari sistem tersebut akan menyebabkan ia bergetar pada tempoh, T yang tertentu ;

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad [1]$$

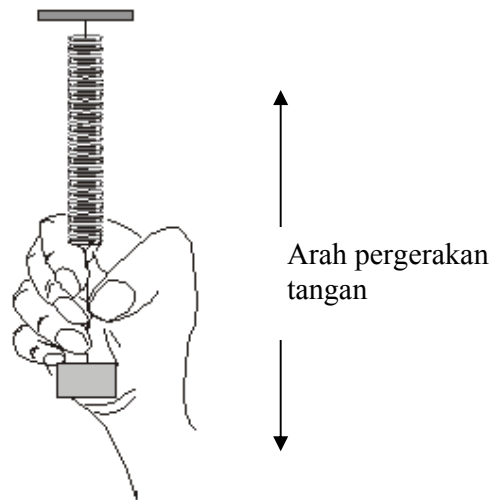


Rajah 3.1 : Sistem Spring Berjisim

Maka getaran bebas dikatakan berlaku apabila suatu sistem getaran yang diganggu cuba untuk mengekalkan kedudukan asalnya dan akan bergetar dengan sendiri.

b. Getaran Paksa

Pertimbangkan sistem jasad berjisim dan spring dalam rajah. Sistem ini tidak bergetar dengan bebas, sebaliknya diganggu oleh daya luar yang dicetuskan oleh tangan yang memegang sistem itu. Oleh itu tempoh, T sistem itu bergetar tidak boleh diperolehi melalui rumus untuk tempoh bagi getaran bebas. Sistem ini akan bergetar bergantung kepada pergerakan tangan tersebut. Dalam sistem ini tangan adalah sistem yang memaksa, manakala spring dan jasad berjisim adalah sistem yang dipaksa. Terdapat daya yang dipindahkan dari tangan kepada sistem tersebut.

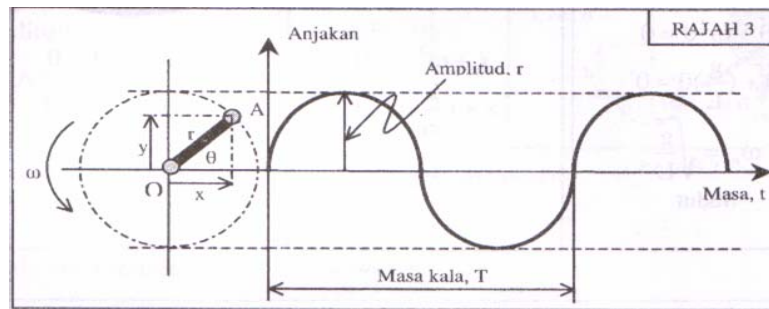


Rajah 3.2 : Sistem Spring Berjisim Dengan Daya Luar

Maka getaran paksa dikatakan berlaku apabila sistem ditindaki oleh satu daya luar dimana ia akan dipaksa bergetar.

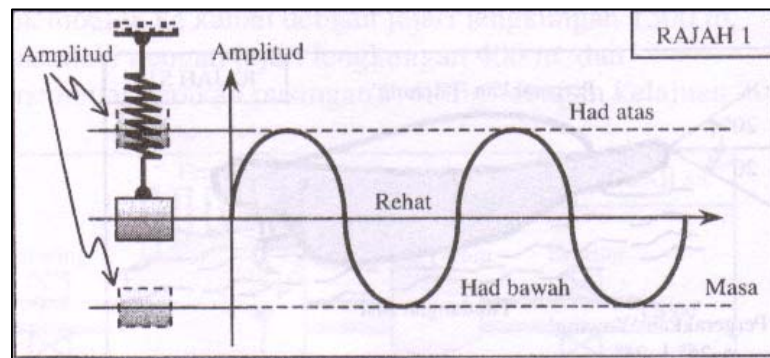
3.1.2 Gerakan Harmonik Mudah

Suatu jasad dikatakan bergetar dengan gerakan harmonik mudah sekiranya ia mempunyai pecutan yang berkadar terus dengan anjakan iaitu daripada satu titik tetap dan akan menghala ke arah titik tetap tersebut.



Rajah 3.3 : Gambarajah Gerakan Harmonik Mudah (Mohd Yunus Abdullah,2003)

3.2 Profil Getaran



Rajah 3.4 : Gambarajah Profil Getaran (Mohd Yunus Abdullah,2003)

3.2.1 Amplitud

Amplitud adalah sesaran maksimum suatu jasad dari kedudukan keseimbangannya. Unitnya adalah meter (m).

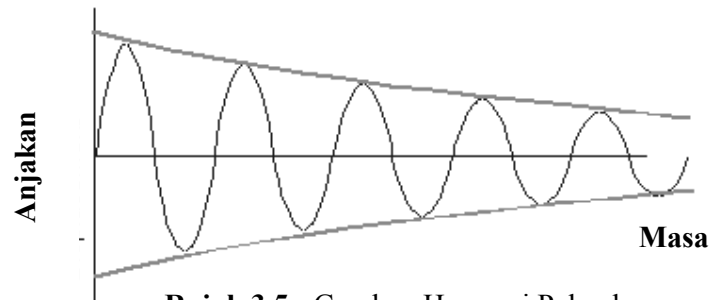
3.2.2 Tempoh

Tempoh adalah masa diambil oleh suatu jasad untuk membuat suatu ayunan atau getaran lengkap. Unitnya adalah saat (s).

$$\text{Tempoh, } T = \text{Masa diambil, } t / \text{bil getaran lengkap} \quad [2]$$

3.2.3 Pelembapan / Peredam (*Damping*)

Suatu sistem bergetar dikatakan mengalami pelembapan jika amplitud getarannya semakin berkurangan dengan masa. Geseran sistem itu dengan udara menyebabkan tenaga terlepas daripada sistem itu dalam bentuk haba.



Rajah 3.5 : Gerakan Harmoni Pelembapan

Pelembapan terbahagi kepada dua iaitu ;

i. Peredam Dalam

Sistem kehilangan tenaga dalam bentuk haba disebabkan oleh molekul-molekul sistem yang diregang dan dimampatkan.

ii. Peredam Luar

Sistem kehilangan tenaga dalam bentuk haba disebabkan oleh daya geseran dari udara sekeliling.

Setiap struktur harus mempunyai sistem peredam untuk mengawal tindakbalas atau respon terhadap daya rangsangan. Maka struktur jambatan juga hendaklah mempunyai sistem peredam yang tersendiri untuk mengurangkan getaran yang terjadi keatasnya.

3.2.4 Frekuensi

Pergerakan dari satu posisi dan kembali ke posisi asal dinamakan kitaran. Oleh itu, tempoh adalah masa yang diambil untuk satu kitaran lengkap. Maka bilangan getaran lengkap sesaat dinamakan frekuensi. Unit bagi frekuensi adalah Hertz (Hz).

$$\begin{aligned} \text{Frekuensi} &= \text{Bil getaran lengkap} / \text{masa diambil} \\ &= \frac{1}{T} \end{aligned} \quad [3]$$

3.2.5 Mod

Mod adalah ciri semulajadi sesuatu struktur. Mod ditentukan melalui sifat bahan seperti jisim, kekukuhan dan ciri pelembapan (*damping*) juga keadaan sempadan struktur tersebut. Setiap mod ditakrifkan sebagai frekuensi asli, pelembapan dan bentuk mod. Jika salah satu sifat bahan atau keadaan sempadan struktur berubah, modnya juga akan berubah.

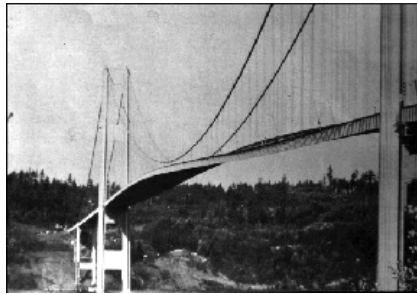
3.3 Frekuensi Asli dan Resonans

Frekuensi asli suatu sistem bergetar ialah frekuensi dimana sistem itu bergetar dalam keadaan bebas tanpa dipengaruhi oleh daya luar. Sebagai contoh jika drum diketuk dengan *stick*, permukaan atas drum akan bergetar pada frekuensi aslinya. Molekul udara dipaksa bergetar kerana ia menyentuh permukaan drum. Udara disekeliling telinga juga bergetar dan dengan sebab itu kita juga dapat mendengar bunyi drum tersebut. Manusia hanya boleh mendengar frekuensi dalam julat 20 hingga 20000 Hz.

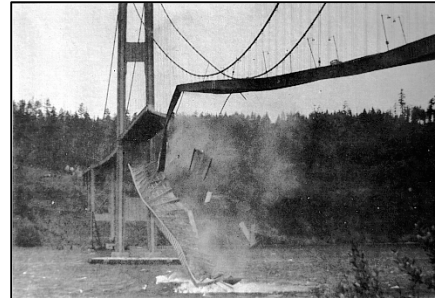
Masalah utama berhubung getaran adalah fenomena resonan. Resonan ini terjadi apabila frekuensi daya paksa adalah senilai dengan frekuensi asli suatu sistem getaran, maka sistem getaran itu akan bergetar dengan amplitud yang paling besar.

Resonan tidak boleh dihapuskan tetapi magnitudnya boleh dikurangkan dengan mengubahsuai bentuk aerodinamik struktur.

Antara kesan buruk fenomena resonan adalah gempabumi, jambatan runtuh akibat amplitud ayunan yang besar semasa jambatan mencapai resonan sebagai contoh, *Tacoma Narrow Bridge* yang telah runtuh pada 1940.



Rajah 3.6.1 : *Tacoma Narrow Bridge*
mula bergetar



Rajah 3.6.2 : *Tacoma Narrow Bridge*
mula runtuh

3.4 Punca-punca getaran

Getaran dapat berlaku dimana-mana sahaja. Getaran mempunyai kebaikan dan keburukan tersendiri. Contoh kebaikannya seperti getaran alat muzik seperti gitar dan drum, manakala keburukannya adalah seperti gerakan atau getaran tanah yang disebabkan oleh gempa bumi. Antara punca-punca getaran adalah;

- i. Getaran yang berlaku akibat pergerakan kenderaan (*traffic vibration*) pada struktur jambatan khususnya akan menyebabkan 'kelesuan' (*fatigue*) pada struktur yang seterusnya akan mengakibatkan retak pada jambatan.
- ii. Di kawasan industri, mesin-mesin yang terdapat di kilang juga berupaya untuk menghasilkan getaran dalam amplitud yang besar.
- iii. Aliran arus elektrik melalui air dan udara.

iv. Letupan khasnya kerja-kerja seperti meruntuhkan bangunan dan pembinaan terowong akan menghasilkan gelombang tenaga yang besar didalam tanah dan melalui udara. Gelombang tenaga itu meningkat dengan mendadak dan akan berkurangan dengan seragam mengikut masa. Jika langkah berjaga-jaga tidak diambil akan menyebabkan kerosakan pada bangunan bersebelahan

v. Punca semulajadi seperti ;

a. Gempabumi.

Gempabumi berlaku apabila berlakunya pergeseran lapisan-lapisan dalam kerak bumi. Gempabumi jenis Tektonik terjadi disebabkan pelepasan tenaga yang terhasil daripada geseran batuan di keratan memanjang sepanjang batuan. Ia boleh diibaratkan getah yang ditarik dan dilepas dengan tiba-tiba. Gempabumi jenis Volkanik pula terjadi apabila berlaku letusan gunung berapi yang dasyat, contohnya Gunung Berapi Krakatua di Jawa Barat Indonesia. Gerakan tanah yang terhasil daripada gempabumi akan menyebabkan berlaku getaran pada struktur.

Jenis-jenis gempabumi ;

- *Collapse earthquake* - Runtuhan lubang besar di dalam bumi.
- *Impact earthquake* - Kesan daripada meteor yang jatuh ke bumi.
- *Volcanic earthquake* - Kesan daripada aktiviti gunung berapi.
- *Tectonic earthquake* - Kesan daripada daya tektonik.
 - Paling kerap terjadi pada masa kini
 - Menyebabkan paling banyak kemusnahan.

b. Angin

Angin adalah fenomena semulajadi yang disebabkan oleh pergerakan zarah-zarah udara dalam atmosfera bumi. Struktur yang mengalami beban angin akan mengalami daya aerodinamik

yang boleh dikelaskan sebagai, beban ufuk selari dengan arah angin dan beban pugak, bersudut tegak dengan arah angin. Kedua-dua daya itu dipengaruhi oleh halaju dan profil angin berdasarkan ketinggian struktur dan ciri-ciri struktur itu sendiri.

Jenis-jenis angin ;

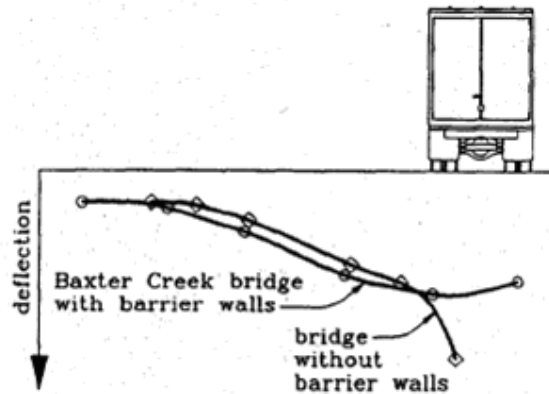
- *Extra-tropical cyclones* (40-90 mph)
- *Tropical cyclones* (90-140 mph)
- *Tornadoes* (>300 mph)

3.5 Getaran Pada Jambatan

Selain daripada beban statik, struktur jambatan turut dipengaruhi oleh tindakan daya dinamik. Daya dinamik ini pula mungkin berpunca daripada pergerakan kenderaan diatas jambatan, tiupan angin, kejadian gempabumi dan juga pergerakan manusia.

Frekuensi asli bagi sebuah jambatan memberi pengaruh yang besar terhadap tindakbalas dinamikanya. Diketahui, untuk jambatan moden umumnya, mempunyai frekuensi asli dalam lingkungan 2 – 5 Hz, berpadanan dengan frekuensi resonan bagi kenderaan komersial. Kebiasaannya frekuensi getaran yang diperolehi menerusi bantuan model komputer hampir sama dengan yang diperolehi dari ujian ditapak.

Selain itu, untuk kes-kes tertentu, pengaruh anggota sampingan terhadap kekukuhan jambatan tidak boleh diambil mudah. Anggota-anggota sampingan termasuklah, laluan pejalan kaki, sistem kekangan dan juga tembok.



Rajah 3.7 : Pengaruh anggota sampingan terhadap kekukuhan jambatan
(O.Chaalall, 1998)

Pergerakan kenderaan diatas jalanraya akan mencetuskan daya dinamik secara langsung pada turapan yang seterusnya akan memindahkan daya dinamik ini ke dalam tanah atau struktur yang berdekatan. Magnitud dan frekuensi getaran yang dihasilkan bergantung pada jisim kenderaan, kelajuan kenderaan, kelakuan getaran oleh kenderaan, keadaan tayar kenderaan, keadaan permukaan turapan (asphalt atau konkrit), kekukuhan turapan dan struktur, ciri-ciri turapan serta jarak antara jalanraya dan struktur berdekatan, jambatan khasnya.

Keadaan permukaan turapan yang tidak seragam dan kelajuan kenderaan adalah punca utama kepada getaran pada struktur jambatan. Pecutan dan nyahpecutan kenderaan pula menyebabkan daya dinamik dpindahkan pada jambatan. Interaksi antara kenderaan-jambatan akan menimbulkan beberapa masalah. Antaranya ialah melemahkan jambatan dan komponen binaannya, membahayakan keselamatan pengguna kenderaan dan jika tidak direkabentuk dengan beban muktamad yang sesuai akan mempengaruhi kapasiti menampung beban oleh jambatan.

Selain itu dalam kebanyakan kes, getaran pada jambatan turut dicetuskan oleh aktiviti manusia. Pergerakan seperti berjalan, berlari dan melompat adalah contoh aktiviti yang dapat mencetuskan getaran pada skala yang kecil. Walaupun begitu, jika tidak diberi perhatian yang sewajarnya, getaran yang dicetuskan aktiviti tersebut akan memberi kesan yang buruk kepada struktur jambatan khasnya.

Struktur jambatan berskala kecil seperti jambatan pejalan kaki, biasanya dibina daripada konkrit, keluli, kayu dan juga komposit. Dalam rekabentuk dan pembinaan moden penggunaan bahan-bahan yang ringan dan kuat semakin bertambah. Maka jambatan pejalan kaki ini adalah lebih ringan dan fleksibel, seterusnya terdedah kepada ancaman getaran. Akibatnya struktur yang dibina akan menyebabkan ketidakselesaan kepada pengguna. Oleh itu, para jurutera hendaklah mengambilkira fenomena getaran ini sewaktu peringkat analisis dan rekabentuk.

Selain itu, struktur jambatan turut dipengaruhi oleh beban angin dan beban gempabumi. Angin adalah fenomena semulajadi yang disebabkan oleh pergerakan zarah-zarah udara dalam atmosfera bumi. Struktur yang mengalami beban angin akan mengalami daya aerodinamik yang boleh dikelaskan sebagai, beban ufuk selari dengan arah angin dan beban pugak, bersudut tegak dengan arah angin. Kedua-dua daya itu dipengaruhi oleh halaju dan profil angin berdasarkan ketinggian struktur dan ciri-ciri struktur itu sendiri. Manakala bagi beban gempabumi, kesannya bagi struktur jambatan di Malaysia boleh diabaikan.

Oleh itu, untuk menentukan kesan getaran ke atas jambatan, akibat faktor yang telah dinyatakan, pengukuran hendaklah dibuat di lokasi tertentu pada jambatan. Bilangan peralatan hendaklah mencukupi ketika ujian dijalankan. Kedudukan peralatan hendaklah dipilih dengan teliti berdasarkan bentuk mod yang diperolehi daripada model komputer.

3.6 Ujian Dinamik Jambatan

3.6.1 Sumber Daya Cetusan

Untuk menilai ciri-ciri dinamik jambatan, terdapat banyak sumber digunakan untuk mencetuskan daya dinamik pada jambatan tersebut. Kaedah yang sering digunakan bagi menentukan frekuensi asli, bentuk mod dan peredam adalah (i) getaran yang dicetuskan oleh angin, sesuai untuk jambatan yang fleksibel seperti jambatan berkabel ; (ii) *eccentric mass shaker*, mencetuskan daya dinamik pada frekuensi yang dikehendaki ; (iii) penggunaan hammer ; dan (iv) beban statik, yang dijatuhkan secara bebas.

Selain kaedah yang disebutkan diatas, ujian dinamik di bawah beban trafik juga boleh digunakan. Melalui kaedah ini, kelajuan kenderaan, berat, jarak gandar dan kedudukan kenderaan diatas jambatan boleh dikawal. Bagaimanapun, kenderaan ini tidak mewakili beban sebenar yang bertindak keatas jambatan.

3.6.2 Jenis Ujian Dinamik

Menurut Norshariza Mohd Bkhari (2005), dewasa ini terdapat pelbagai kaedah yang digunakan untuk menilai keadaan struktur, jambatan khasnya. Ini termasuklah kaedah yang berdasarkan ciri-ciri statik dan dinamik. Bagaimanapun kaedah menggunakan ciri-ciri dinamik dilihat mempunyai lebih banyak kelebihan berbanding dengan ciri statik. Ujian dinamik untuk mengenalpasti parameter mod pada jambatan terbahagi kepada tiga iaitu ujian getaran bebas (*free vibration test*), ujian getaran persekitaran (*ambient vibration test*) dan ujian getaran paksa (*forced vibration test*).

3.6.2.1 Ujian Getaran Persekitaran (*ambient vibration test*)

Semua jambatan terdedah kepada getaran yang dicetuskan oleh persekitarannya seperti angin, kenderaan dan gerakan seismik. Ujian getaran jenis ini telah digunakan dengan meluas untuk ujian dinamik keatas struktur jambatan khususnya. Untuk jambatan yang bersaiz besar, ujian ini adalah yang paling praktikal untuk mencetuskan getaran, pada frekuensi yang tinggi. Ini disebabkan penggunaan peralatan untuk mencetuskan getaran dilihat bukan satu langkah yang bijak, akibat pertambahan saiz jambatan. Ujian ini juga dijalankan pada jambatan kecil dimana faktor-faktor lain dijadikan kekangan dan hanya mempertimbangkan faktor persekitarannya. Ia merupakan kaedah yang cepat dan murah untuk mendapatkan parameter mod (*modal parameter*). Ujian ini pada kebiasaannya dijalankan dengan menempatkan alat pengukuran pada beberapa lokasi di sepanjang struktur. Melaluinya, frekuensi asli dan bentuk mod (*mod shape*) boleh diperolehi

3.6.2.2 Ujian Getaran Paksa (*forced vibration test*)

Ujian ini adalah kaedah yang sering digunakan dalam ujikaji dinamik pada struktur jambatan yang bersaiz kecil. Antara ujian yang dikaitkan dengan ujian getaran paksa adalah *Impact Testing* dan *Shaker Measurement*

Bagi *Impact Testing*, ia adalah kaedah yang sering digunakan. Ia merupakan kaedah yang cepat, mempunyai kos yang rendah dan paling sesuai dalam mendapatkan parameter getaran struktur. Antara peralatan yang digunakan adalah *impact hammer*; untuk mengukur daya input, *accelerometer*; untuk mengukur pecutan pada titik tertentu, *FFT analyzer*; untuk mendapatkan *Frequency Response Function*, dan *post-processing modal software*, untuk mengenalpasti parameter getaran dan bentuk mod.



Rajah 3.8 : Alat untuk *Impact Testing*

Impact Testing tidak dapat dijalankan pada semua struktur. Bagi struktur yang permukaannya lembut, kaedah yang digunakan adalah *Shaker Measurement*. Alat *shaker* akan dipasang pada struktur dengan menggunakan sebatang rod panjang yang dipanggil *stinger*. *Shaker* ini akan menghasilkan daya impak keatas struktur jambatan, melalui paksi *stinger* ini. Alat yang dipanggil *load cell* pula akan dipasang diantara struktur dan *stinger* untuk mengukur daya yang dicetuskan.



Rajah 3.9 : Alat Untuk *Shaker Measurement*

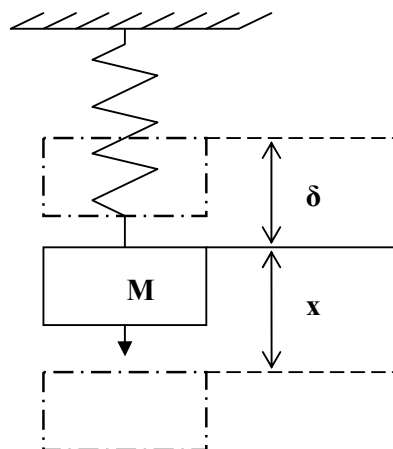
3.7 Kesan Getaran ke atas Struktur Jambatan

Fenomena getaran sering mendatangkan masalah kepada struktur, jambatan khususnya. Getaran ini akan membentuk tegasan dinamik yang akan menyebabkan kegagalan pada struktur akibat kelesuan (*fatigue*). Getaran juga, jika berlaku pada skala yang besar contohnya akibat ribut atau gempabumi, akan mendatangkan kerosakan yang teruk. Malah ia boleh meranapkan dan meruntuhkan struktur, jambatan khususnya. Dalam pada itu jika getaran berlaku pada skala yang kecil, ia akan mendatangkan ketidakselesaan kepada pengguna dan boleh juga membahayakan sekiranya dibiarkan berterusan.

3.8 Teori Getaran Bebas

3.8.1 Getaran Bebas Bagi Sistem Satu Darjah Kebebasan

i. Kaedah Hukum Newton - Keseimbangan Dinamik



Rajah 3.10 : Gambarajah Spring Berjisim

Pertimbangkan sistem spring berjisim pada rajah 3.10. Sekiranya sistem tidak mengalami sebarang penyusutan tenaga, maka tenaga terabadi, iaitu Jumlah tenaga = Tenaga Kinetik + Tenaga Keupayaan

$$\text{atau boleh juga ditulis sebagai, } \frac{d}{dt} (T.K + T.U) = 0 \quad [4]$$

$$\text{Katakan tenaga kinetik adalah, } T.K = \frac{1}{2} m\dot{x}^2 \quad [5]$$

$$\text{dan tenaga keupayaan adalah, } T.U = \int_0^x [mg - k(x + \delta)x] dx = \frac{1}{2} kx^2 \quad [6]$$

$$\text{gantikan kedalam persamaan am tenaga, } \frac{d}{dt} (T.K + T.U) = 0 \quad [7]$$

$$\text{akan memberikan, } \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m\dot{x}^2 + \frac{1}{2} kx^2 \right) = 0 \quad [8]$$

$$\text{selesaikan iaitu, } (2) \left(\frac{1}{2} m\dot{x} \right) (\ddot{x}) + (2) \left(\frac{1}{2} kx \right) (\dot{x}) = 0 \quad [9]$$

$$\text{seterusnya, } m\ddot{x} + kx = 0 \text{ atau } \ddot{x} + \left(\frac{k}{m} \right) x = 0 \text{ dan } \ddot{x} + (\omega_n^2) x = 0$$

maka, frekuensi asli bagi sistem spring berjisim ini adalah,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ rad/s} \quad [10-1]$$

atau dengan cara lain

$$(T.K)_{\text{mak}} = (T.U)_{\text{mak}}$$

dengan T.K = tenaga yang tersimpan oleh jisim disebabkan halajunya

T.U = Kerja ke atas daya graviti.

Berdasarkan Gerakan Harmonik Mudah ,

$$x = A \sin \omega t \text{ dengan } x_{\text{mak}} = A \quad [11]$$

$$\dot{x} = A\omega \cos \omega t \text{ dengan } \dot{x}_{\text{mak}} = A\omega \quad [12]$$

$$\frac{1}{2} m\dot{x}_{\text{mak}}^2 = \frac{1}{2} kx_{\text{mak}}^2 \quad [13]$$

$$\text{selesaikan, } m(A\omega)^2 = k(A)^2 \quad [14]$$

maka frekuensi asli sistem spring berjisim adalah,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ rad/s} \quad [15]$$

Tempoh untuk getaran, T pula ditentukan menerusi

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad [16]$$

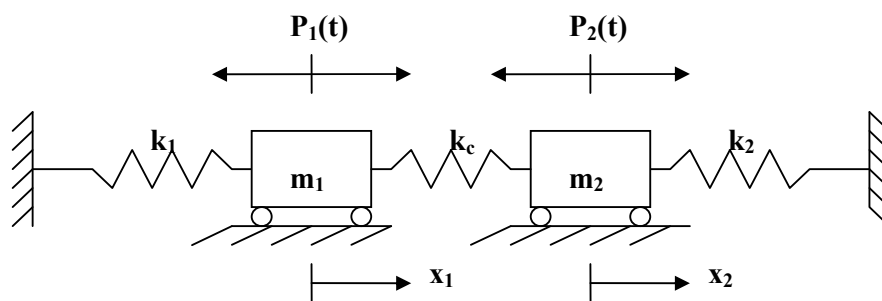
dengan $\sin \omega t$ dan $\cos \omega t$ adalah fungsi masa pada satu tempoh T iaitu,

$$\omega (T + t) - \omega t = 2\pi \quad [17]$$

Bilangan getaran persaat pula, ataupun frekuensi getaran, 1 getaran/s atau 1 Hz ditentukan menerusi,

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad [18]$$

3.8.2 Getaran Bebas untuk Sistem Kebebasan Darjah Berbilang



Rajah 3.11 : Sistem spring berjisim bagi dua darjah kebebasan

Pertimbangkan dua sistem spring berjirim seperti pada rajah. Dari gambarajah badan bebas, persamaan untuk pergerakan untuk dua jisim tersebut adalah

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 - k_c x_1 + k_c x_2 + P_1(t) \quad [19]$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 x_2 + k_c x_1 - k_c x_2 + P_2(t) \quad [20]$$

Persamaan ini boleh ditulis dalam bentuk matriks sebagai ;

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_c & -k_c \\ -k_c & k_2 + k_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} \quad [21]$$

Bagi menentukan frekuensi asli dan bentuk mod bagi getaran, gantikan $P_1(t) = P_2(t) = 0$. Seterusnya akan menghasilkan,

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_c & -k_c \\ -k_c & k_2 + k_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [22]$$

Jisim juga dianggap bergetar bebas dengan gerakan harmonik mudah, oleh itu

$$x_1 = X_1 \sin \omega t \quad [23]$$

$$x_2 = X_2 \sin \omega t \quad [24]$$

$$\ddot{x}_1 = -X_1 \omega^2 \sin(\omega t) \quad [25]$$

$$\ddot{x}_2 = -X_2 \omega^2 \sin(\omega t) \quad [26]$$

Gantikan nilai x dan \ddot{x} kedalam persamaan [21], akan membentuk

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_c & -k_c \\ -k_c & k_2 + k_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [27]$$

atau ,

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_c - \omega^2 m_1 & -k_c \\ -k_c & k_2 + k_c - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [28]$$

Persamaan 7 akan terbukti jika penentu ;

$$\begin{vmatrix} k_1 + k_c - \omega^2 m_1 & -k_c \\ -k_c & k_2 + k_c - \omega^2 m_2 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = 0 \quad [29]$$

Pengembangan penentu diatas, akan menghasilkan persamaan

$$\omega^4 - [(k_1 + k_c) / m_1 + (k_2 + k_c) / m_2] \omega^2 + [k_1 k_2 + (k_1 + k_2) k_c] / m_1 m_2 = 0 \quad [30]$$

dengan dua frekuensi asli iaitu ω_1 dan ω_2 boleh ditentukan.

Jika nilai ω_1 dan ω_2 digantikan kedalam persamaan 6, akan menghasilkan persamaan

$$\left(\frac{X_1}{X_2} \right)_1 = \frac{k_c}{k_1 + k_c - \omega_1^2 m_1} = \frac{k_2 + k_c - \omega_1^2 m_2}{k_c} \quad [31]$$

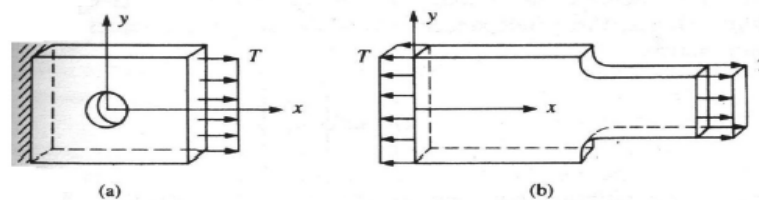
$$\left(\frac{X_1}{X_2} \right)_2 = \frac{k_c}{k_1 + k_c - \omega_2^2 m_1} = \frac{k_2 + k_c - \omega_2^2 m_2}{k_c} \quad [32]$$

dengan bentuk mod pertama dan kedua boleh ditentukan melalui nisbah $(X_1 / X_2)_1$ dan $(X_1 / X_2)_2$.

3.9 Kaedah Unsur Terhingga

3.9.1 Pengenalan

Bagi struktur seperti rasuk, kekuda dan kerangka, ia boleh dianalisis dengan menggunakan kaedah kekakuan dan kebolehlenturan. Namun ia tidak dapat digunakan untuk menganalisis unsur terlanjar (*continuum*) seperti plat. Bagi mengatasi masalah ini, kaedah unsur terhingga boleh digunakan. Malahan kaedah unsur terhingga memainkan peranan penting dalam menyelesaikan masalah berkaitan getaran pada struktur.



Rajah 3.12 : Contoh Struktur terlanjar

Struktur terlanjar seperti plat dengan darjah kebebasan tak terhingga sesuai dianalisis dengan kaedah ini. Struktur akan dibahagikan kepada beberapa unsur. Proses ini dinamakan *discretization*. Unsur-unsur ini bersambung pada titik yang dipanggil nod. Struktur plat tersebut kini mempunyai unsur dan darjah kebebasan yang terhingga. Kekakuan setiap unsur dan anjakan setiap nod dapat diperolehi dengan menggunakan persamaan yang sama dengan kaedah kekakuan iaitu;

$$\{F\} = [K]\{x\} \quad [33]$$

Untuk tujuan analisis dinamik, inersia dan faktor peredam hendaklah dipertimbangkan, maka persamaan matriks yang diperolehi adalah ;

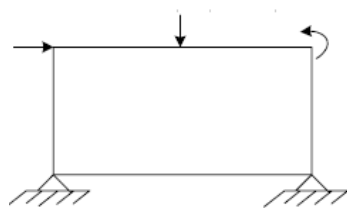
$$[M] \{ \ddot{x} (t) \} + [C] \{ \dot{x} (t) \} + [K] \{ x (t) \} = \{ f (t) \} \quad [34]$$

Matriks jisim $[M]$ boleh diformulakan secara konsisten ataupun secara terkumpul (*lumped*). Formula yang konsisten mengandaikan jisim teragih secara seragam pada keseluruhan elemen dengan menggunakan *shape function*. Formula secara pukal atau terkumpul pula mengandaikan jisim hanya tertumpu pada nod dan matriks jisimnya mengandungi *diagonal element*, dengan hasil kiraan yang lebih tepat.

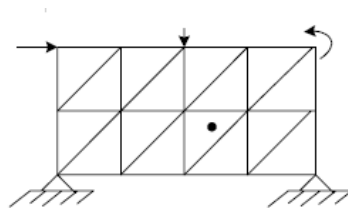
Terdapat banyak formula untuk mendefinisikan matriks peredam $[C]$. Pemilihan persamaan matriks peredam yang sesuai adalah berdasarkan keperluan penggunaannya. Ini disebabkan oleh mekanisme peredam yang sukar difahami. Biasanya terdapat dua persamaan yang sering digunakan iaitu seperti persamaan diatas dan persamaan peredam *Rayleigh (Rayleigh Damping)*,

$$[C] = a_1[M] + a_2[K] \quad [35]$$

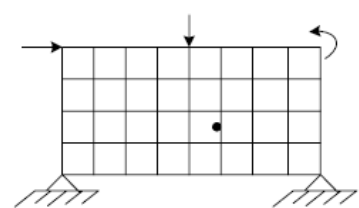
Tegasan dan keterikan dalam setiap unsur diperolehi menerusi hubungan antara anjakan dan daya pada setiap nod. Beberapa persamaan akan diperolehi untuk mendapatkan anjakan pada setiap nod pada struktur tersebut. Dengan menyelesaikan siri persamaan ini, tegasan, keterikan, frekuensi asli dan bentuk mod akan diperolehi. Ketepatan kaedah ini bergantung pada jumlah, saiz dan jenis unsur yang digunakan untuk memodelkan struktur.



Rajah 3.13.1 : Struktur terlanjar dengan darjah kebebasan TAK terhingga



Rajah 3.13.2 : Pembahagian kepada unsur segitiga, dengan darjah kebebasan terhingga



Rajah 3.13.3 Pembahagian kepada unsur segiempat, dengan darjah kebebasan terhingga

3.10 Modal Analysis

Modal analysis merupakan satu kaedah untuk mendapatkan ciri-ciri dinamik untuk sesuatu struktur seperti frekuensi asli dan bentuk mod. Ia adalah salah satu kaedah analisis dinamik dan sering juga dikenali sebagai *eigenvalue analysis*. Kaedah ini adalah berdasarkan tindakbalas struktur di bawah getaran bebas tak teredam yang disebabkan gangguan awal (*initial disturbance*) dalam kedudukan keseimbangan statik.

Persamaan untuk penyelesaian persamaan ini diperolehi dari persamaan umum getaran dengan menganggap nilai peredam dan daya yang dikenakan adalah bersamaan sifar. Persamaan untuk anjakan vektor daya adalah (Norshariza Mohd Bkhari, 2005),

$$\{ x \} = \{ A \} \sin (\omega_n t)$$

dengan A adalah amplitud anjakan untuk setiap nod dan ω_n adalah frekuensi getaran. Maka vektor halaju,

$$\{ \dot{x} \} = \{ A \} \omega_n \cos (\omega_n t)$$

Dan pecutan adalah,

$$\{ \ddot{x} \} = \{ A \} \omega_n^2 \sin (\omega_n t)$$

Dengan memasukkan persamaan ini ke dalam persamaan umum, persamaan *eigenvalue* akan diperolehi,

$$([K]) - \lambda [M] \{ A \} = 0$$

dengan *eigenvalue*, λ adalah sama dengan ω_n^2 dan $\{ A \}$ adalah *eigenvector* yang mempunyai hubungan dengan setiap nilai λ . Jumlah *eigenvalue* atau frekuensi asli adalah sama dengan jumlah darjah kebebasan pada model. Setiap *eigenvalue* atau

frekuensi mempunyai kaitan dengan *eigenvector* atau bentuk mod. Disebabkan *eigenvector* tidak boleh diabaikan, maka persamaan yang perlu diselesaikan adalah

$$([K]) - \lambda [M] = 0$$

Lazimnya hanya beberapa nilai awal *eigenvalue* yang dipertimbangkan. Ini disebabkan model unsur terhingga hanyalah berasaskan anggapan semata-mata. Oleh itu semakin tinggi nilai *eigenvalue* dan *eigenvector*, maka ianya semakin tidak tepat. Penyelesaian secara teori membayangkan struktur akan bergetar dalam pelbagai bentuk mod. Bagaimanapun, disebabkan kehadiran peredam dalam struktur, getaran tersebut diabaikan.

3.11 Perisian LUSAS 13.5

Dalam kajian ini perisian LUSAS telah dipilih untuk menjalankan analisis dinamik terhadap jambatan. Perisian ini sangat sesuai untuk menyelesaikan masalah berkaitan unsur terhingga bagi pelbagai bidang kejuteraan contohnya aeroangkasa, mekanikal dan kejuteraan awam khususnya. Bagi struktur kejuteraan awam seperti jambatan, bangunan, menara dan sebagainya, penggunaan perisian LUSAS sering menjadi pilihan memandangkan ia mudah untuk digunakan dan memberi keputusan analisis yang tepat.

3.12 Alatan untuk Ujian Dinamik ke atas jambatan

Pemilihan peralatan yang sesuai adalah perkara yang perlu diberi perhatian sebelum menjalankan ujian di tapak. Peralatan yang dipilih perlulah mempunyai ciri-ciri seperti tahan lasak, mampu memberi bacaan yang tepat dan mudah untuk

dipasang. Alatan yang dipilih tidak perlu terlalu mahal ataupun terlalu murah. Pengkaji hendaklah menitikberatkan kualiti peralatan tersebut tanpa menilai pada harganya.

Selain itu, alatan yang dipilih seharusnya mempunyai rekod penggunaan yang baik. Ia juga haruslah tahan lasak dalam persekitaran yang tidak menentu di tapak. Faktor lain dalam pemilihan peralatan adalah, sentiasa konsisten dalam mengambil ukuran. Pengguna peralatan pula hendaklah mempunyai pengetahuan tentang peralatan yang dipilih agar tidak timbul kesukaran sewaktu ujian di tapak di jalankan

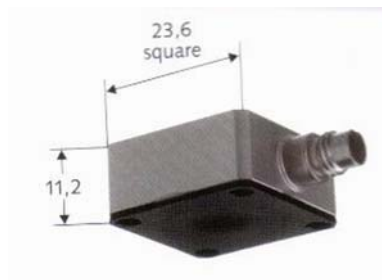
Peralatan yang sering digunakan semasa ujian di tapak adalah *accelerometer*, *strain gauges*, pengesan suhu dan perakam data. Data – data seperti anjakan dan ubah bentuk diperlukan untuk mendapatkan nilai faktor dinamik, manakala *accelerometer* berfungsi untuk menentukan ciri-ciri dinamik struktur.

Pemilihan lokasi untuk menempatkan peralatan memainkan peranan penting dalam meramal tingkahlaku jambatan. Ia perlu bersesuaian dengan kaedah analisis yang akan diguna pakai. Untuk itu, kaedah unsur terhingga dilihat dapat membantu dalam menentukan lokasi-lokasi yang kritikal pada jambatan. Lokasi kritikal pada jambatan boleh dikelaskan seperti zon-zon lemah dan kawasan yang mengalami pembebanan.

Secara praktikalnya, ia adalah amalan yang baik dalam menjalankan pengukuran pada lebih dari satu titik atau lokasi semasa ujian di tapak. Ini kerana setiap struktur terdiri daripada bilangan nod yang banyak. Akan tetapi tidak semua lokasi akan mengalami anjakan pada frekuensi tertentu. Maka peralatan perlulah ditempatkan di beberapa lokasi sewaktu ujian dijalankan.

Semua peralatan juga hendaklah dilindungi daripada udara persekitaran yang lembap. Ini bertujuan untuk mencegah berlakunya pengkaratan pada alat yang akan mengganggu ketepatan alat dalam mengambil bacaan.

3.12.1 Accelerometer



Rajah 3.14 : *K-Beam Capacitive Accelerometer* Jenis 8310A2 keluaran Kistler

Accelerometer amat sesuai digunakan untuk kajian kualiti pemanduaan kenderaan, analisis struktur, bangunan dan juga getaran jambatan. Alat ini digunakan dalam setiap ujian dinamik tidak kira untuk ujian struktur, angkasa, ketenteraan, bidang automotif dan kejuruteraan awam. Accelerometer mempunyai frekuensi dalam nisbah 30 Hz hingga 150 Hz. Umumnya frekuensi asli yang pertama untuk jambatan adalah sekitar 1 Hz dan selebihnya adalah kurang dari 50 Hz. Untuk menentukan bentuk mod, beberapa *accelerometer* perlu ditempatkan pada jambatan.

3.12.2 Alat Capaian Data



Rajah 3.15 : Gambarajah alat capaian data DEWE-3000 keluaran Dewetron.

Alat capaian data berfungsi untuk merekod data seperti anjakan, pecutan maksimum, tegasan dan terikan serta penentuan faktor peredam untuk keseluruhan struktur. Alat capaian juga perlu mampu untuk mendapatkan bacaan alat pengesan pada kadar bacaan yang sesuai. Selain itu, ia juga satu amalan yang baik dalam mengambil bacaan lebih dari sekali, bagi mendapatkan isyarat dinamik dengan resolusi yang memuaskan.

Bagi kajian ini alat capaian data yang digunakan ialah jenis DEWE-3000 keluaran Dewetron. Merujuk Rajah 3.15, alat ini mempunyai asas PC seperti PC industri integrate, Slot CPU dan slot amplifiers. Ia dapat menyimpan data sebanyak 40GB selama 7.7 hari. Saiz alatan ini ialah 372x258x165mm dan seberat 8kg.

3.11.3 Contoh *Shaker*



Rajah 3.16 : *APS Dynamics Model 113 Long-Stroke Shaker*

Alat seberat 35kg dan mudah alih ini digunakan pada struktur kejuruteraan awam bersaiz sederhana. Alat ini juga telah digunakan pada lantai konkrit yang panjang dan jambatan pejalan kaki. Alat ini bertujuan untuk mencetuskan daya dinamik pada struktur dan seterusnya ciri-ciri dinamik struktur seperti frekuensi asli, faktor peredam dan bentuk mod dapat ditentukan.

3.11.4 Contoh *Impact Hammer*



Rajah 3.17 : *DYTRAN Model 5803A Instrumented Impulse Hammer*

Impact Hammer jenis ini merupakan sejenis alat yang beroperasi secara manual untuk penggunaan beban sementara pada struktur yang berfrekuensi rendah.

Beratnya adalah 5.4kg dan sering digunakan bersama-sama dengan *spectrum analyzer*. Ia sangat sesuai untuk ujian ditapak bagi struktur kejuteraan awam yang bersaiz kecil dan sederhana. Cara penggunaannya adalah dengan mengetuk alat ini pada struktur yang seterusnya akan menyebabkan struktur bergetar. *Accelerometer* yang dipasang pada struktur akan mengesan frekuensi dari getaran yang dicetuskan oleh *impact hammer* tersebut.

BAB IV

MEMODEL STRUKTUR

4.1 Pengenalan.

Terdapat beberapa anggapan perlu dibuat semasa memodelkan struktur. Anggapan – anggapan yang dibuat hendaklah bersesuaian bagi memastikan ia menggambarkan keadaan sebenar struktur. Oleh itu, hasil analisis yang menghampiri keadaan sebenar akan diperolehi. Anggapan yang tidak relevan hendaklah diabaikan.

Struktur boleh dimodel dalam bentuk 2D atau 3D mengikut kesesuaian. Selain itu pemilihan elemen seperti *beam element*, *thick shell element* haruslah menepati ciri-ciri struktur. Keadaan sempadan untuk jambatan juga samada disokong rola atau sokong pin juga mempengaruhi keputusan analisis.

4.1.1 Memodel Struktur

Dalam kajian ini, hanya anggota-anggota utama jambatan sahaja dipertimbangkan untuk dimodel. Rasuk-rasuk jambatan akan diwakili oleh elemen garisan dan dimodel sebagai elemen *thick beam*. Sementara *deck* kayu pula diwakili oleh elemen permukaan dan dimodel sebagai elemen *thick shell*.

Struktur jambatan ini dianggap mempunyai satu rentang kerana ia disokong mudah. Untuk keadaan sempadan pula, jambatan dianggap disokong rola disatu hujung dan disokong pin disatu hujung yang berikutnya.

4.1.2 Latar Belakang Struktur



Rajah 4.1: Pandangan Sisi Jambatan

Jambatan kayu di Tasik UTM telah dibina untuk tujuan rekreasi. Jambatan ini mempunyai satu rentang sahaja sepanjang 14 meter. Jambatan ini terdiri daripada dua rasuk keluli *I-Beam* (305x165)mm dan satu anggota keluli *RHS* (160x80)mm sebagai rasuk utama. Terdapat juga lima lagi anggota keluli *RHS* (160x80)mm yang berfungsi sebagai rasuk kedua dan *bracing* antara rasuk utama.

Jambatan ini menyokong struktur kayu di atasnya. Struktur tersebut terdiri daripada pemegang sepanjang 14m, tiang utama setinggi 1m berjarak 2m antara satu sama lain dan *deck* yang terdiri daripada 121 keping kayu berjarak 116mm antara satu sama lain. Struktur kayu ini hanya diletakkan di atas rasuk keluli tersebut. Ia hanya dibolt untuk menyokongnya pada sisi rasuk keluli melalui satu struktur yang bersambungan dengan tiang kayu utama.

Pelan asal untuk jambatan ini telah diperolehi dari Pejabat HartaBina UTM. Asalnya jambatan ini disokong oleh rasuk kayu. Bagaimanapun penulis telah diberitahu bahawa rasuk tersebut telah reput dan digantikan dengan rasuk keluli. Bagaimanapun penulis tidak memperolehi pelan terkini jambatan tersebut. Oleh hal yang demikian penulis telah menjalankan kerja mengukur untuk mendapatkan dimensi sebenar jambatan tersebut.



Rajah4.2 : Pandangan dari arah depan

Untuk bahagian-bahagian yang sukar diukur, terutamanya bahagian bawah jambatan seperti tebal *web* untuk rasuk keluli UB, tebal anggota keluli RHS, dan *bracing*, penulis telah membuat beberapa anggapan yang bersesuaian.

4.2 Jenis Elemen

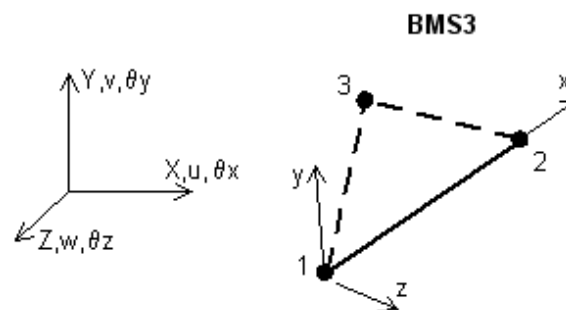
Pemilihan elemen yang akan digunakan bergantung pada keadaan struktur, masalah yang dihadapi dan kehendak analisis. Jika hanya frekuensi asli sahaja yang diperlukan, maka memadai dengan menggunakan elemen yang mudah. Anggota jambatan seperti rasuk dan *deck*, mudah terdedah kepada getaran pada frekuensi asli yang rendah. Oleh itu struktur jambatan boleh dimodel dengan elemen *thick beam* dan *thick shell*.

Terdapat beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan dalam memilih elemen ini. Beberapa persoalan akan timbul seperti, (Norshariza, 2005)

- i. Apakah elemen yang terdapat dalam sistem ?
- ii. Elemen apa yang disyor untuk digunakan ?
- iii. Elemen apa yang dapat memberi keputusan yang tepat ?
- iv. Jika lebih dari satu elemen diperlukan, apakah ia sesuai untuk dipadankan dengan elemen yang lain ?

Oleh hal yang demikian elemen yang dipilih perlulah bersesuaian dengan struktur yang hendak dikaji.

4.2.1 Elemen *Thick Beam* BMS3



Rajah 4.3 : *Elemen Thick Beam*

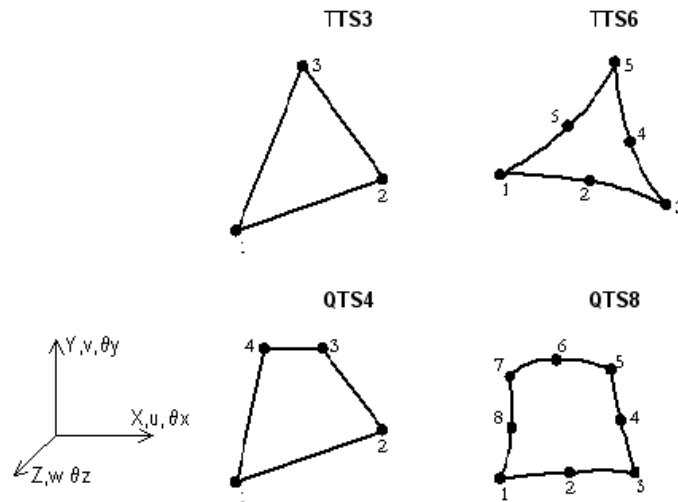
Elemen *Thick Beam* ini sesuai digunakan untuk analisis linear, eigen dan juga dinamik. *Thick Beam* merupakan elemen rasuk dalam bentuk 3D dengan kesan ricih. Ciri-ciri geometri sepanjang elemen adalah seragam.

Ia terdiri daripada 3 nod bebas. Nod yang ketiga digunakan untuk mentakrifkan satah tempatan x-y. Setiap nod terdiri daripada 6 darjah kebebasan iaitu anjakan pada arah X,Y dan Z (U, V, W) serta putaran pada paksi X, Y dan Z (qx, qy, qz).

Elemen ini boleh ditakrifkan melalui 2 atau 3 nod, luas keratan rentas (A), momen sifat tekun pada paksi y dan z (Iyy, Izz), momen kilasan (Kt), tebal elemen (t), kesan ricih pada satah tempatan yz (Asz, Asy), kesipian (ez) dan juga sifat bahan.

Taburan daya sepanjang rasuk adalah daya paksi seragam, kilasan seragam, daya ricih linear dan momen kuadratik. Anjakan yang berlaku sepanjang rasuk adalah linear pada paksi, putaran linear dan anjakan kubik melintang (*cubic transverse displacement*). Keterangan untuk elemen ini boleh diabaikan. Walaupun elemen ini tidak boleh memodel tingkahlaku tak linear, tetapi ia boleh digabung dengan elemen lain untuk analisis tak linear.

4.2.2 Elemen *Thick Shell*



Rajah 4.4 : Elemen *Thick Shell*

Shell merupakan kumpulan elemen untuk menganalisis, yang geometrinya berbentuk lengkung atau lurus. Ketebalan untuk semua elemen dianggap seragam. Elemen ini terdiri daripada 3,4,6 dan 8 nod yang disusun mengikut arah lawan jam. Setiap nod terdiri daripada 6 darjah kebebasan iaitu anjakan pada arah X,Y dan Z (U, V, W) serta putaran pada paksi X, Y dan Z (q_x, q_y, q_z).

Elemen ini boleh digunakan untuk menganalisis struktur *shell* 3D berbentuk rata atau lengkung dengan ricih pada arah melintang diambilkira. Keadaan ini sering berlaku pada struktur *thick shell* dengan ricih pada arah melintang (*transverse shear deformation*) akan mempengaruhi tindak balas struktur. Elemen *thick shell* menawarkan formula kekakuan tangen (*tangent stiffness formulation*) yang konsisten dan ia sangat efektif dari segi geometri dalam analisis tak linear. Formula untuk elemen *thick shell* juga mengambilkira kesan ricih, membran dan lenturan.

Elemen ini boleh ditakrifkan menerusi ketebalannya. Tebalnya dianggap berubah dengan seragam untuk setiap luas pada elemen. Bagi kajian ini, tebal untuk

setiap nod dianggap seragam dengan *deck* kayu jambatan ini mempunyai ketebalan 40mm.

4.3 Sifat Keratan Dan Dimensi

Untuk memodel struktur jambatan ini, penulis telah merujuk *BS 5950* untuk struktur keluli dan *MS 544* untuk kayu bagi mendapatkan sifat keratan dan dimensi. Sifat keratan adalah seperti dalam jadual 4.1 ;

Jadual 4.1 : Dimensi dan sifat Keratan *I-Beam* dan *RHS Beam*

Maklumat		<i>I-Beam</i> (Rasuk Utama)	<i>RHS Beam</i> (Rasuk Utama)	<i>RHS Beam</i> (Rasuk Kedua dan Bracing)
Panjang	L (m)	14	14	1.8
Saiz	D x B (mm)	305x165x40	160x80x10	160x80x10
Berat	Kg/m	40.3	33.7	33.7
Luas Keratan	A(mm ²)	5.13 x10 ³	4.29 x10 ³	4.29 x10 ³
Momen Inersia	I _{zz} (mm ⁴)	7.64 x10 ⁶	4.11 x10 ⁶	4.11 x10 ⁶
	I _{yy} (mm ⁴)	85.03 x10 ⁶	12.84 x10 ⁶	12.84 x10 ⁶
Torsional Constant	J (cm ⁴)	14.7	1041	1041

4.4 Sifat Bahan

Sifat-sifat bahan akan ditakrifkan untuk setiap jenis elemen. Sifat-sifat bahan termasuklah Modulus Young, ketumpatan dan Nisbah Poisson. Dalam kajian ini pengaruh suhu ke atas struktur diabaikan. *Deck* kayu dianggap sebagai satu rentang memanjang, bukan terdiri daripada 121 batang kayu yang disusun melintang. Selain itu, setiap elemen juga dianggap isotrofik, iaitu nilai Modulus Young adalah seragam untuk semua arah. Satu perkara yang perlu diberi perhatian dalam data input analisis dinamik adalah ketumpatan struktur. Ini disebabkan data ketumpatan dapat menentukan berat sendiri struktur yang dimodel.

Jadual 4.2 : Sifat Keluli (sumber *BS 5950*)

Struktur Binaan	Modulus Young (kN/mm ²)	Nisbah Poisson ν	Ketumpatan (kg/ m ³)
<i>I-Beam</i> (Rasuk Utama)	205	0.3	7856
<i>RHS Beam</i> (Rasuk Utama, Rasuk Kedua, Bracing)	205	0.3	7855

Jadual 4.3 : Sifat Kayu (sumber *MS 544*)

Jenis Kayu	Kayu Keras	Ketumpatan (kg/ m ³)	Modulus Keanjalan (kN/mm ²)	
			purata	Minimum
Chengal	Berat	980	19	14

4.5 Model Unsur Terhingga

Untuk setiap model struktur, ia haruslah dibahagikan kepada unsur-unsur kecil ataupun unsur terhingga, sebelum di analisis. Pembahagian unsur-unsur haruslah dibuat dengan teliti. Unsur-unsur yang halus (*fine mesh*) membantu untuk mendapatkan keputusan yang lebih tepat. Ini boleh dikaitkan dengan analisis statik bagi menentukan nilai tegasan maksimum contohnya. Bagaimanapun untuk analisis dinamik, tegasan kurang diberi perhatian berbanding dengan keperluan untuk mendapatkan frekuensi asli dan anjakan disebabkan tindakbalas dinamik. Maka memadai dengan membahagikan unsur secara kasar (*coarse mesh*) bagi menentukan frekuensi asli.

Dalam kajian ini, elemen garisan dan elemen permukaan digunakan untuk memodel struktur jambatan. Kedua-dua elemen ini harus mempunyai pembahagian elemen yang sama dari segi bilangan dan saiz. Ini bertujuan untuk memastikan kedua-dua elemen itu berpadanan dan sesuai untuk digabungkan.

4.6 Pembebanan dan Keadaan Sempadan.

Untuk kajian ini, jambatan ini dimodel dengan disokong pin pada satu hujung dan disokong rola pada satu hujung yang berikut. Sokong pin dikekang pada arah x, y dan z . Manakala sokong rola dikekang pada arah x dan z berdasarkan paksi global. Untuk pembebanan, hanya berat sendiri jambatan sahaja dipertimbangkan.

BAB V

ANALISIS DATA DAN KEPUTUSAN

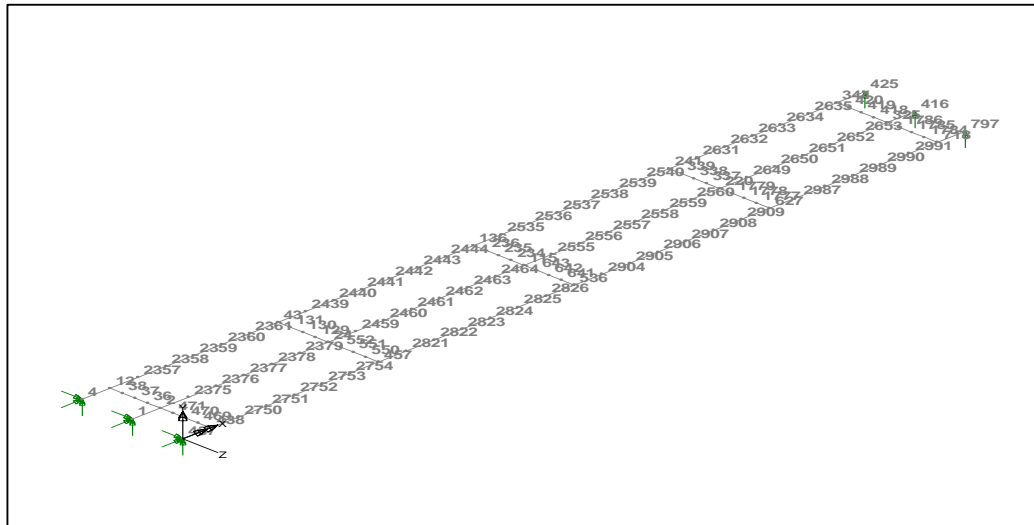
5.1 Pengenalan

Dalam kajian ini, struktur jambatan telah dimodel sebagai model unsur terhingga untuk dianalisis. Model ini akan digunakan bagi menentukan frekuensi asli dan bentuk mod struktur jambatan. *Modal Analysis* telah digunakan sebagai kaedah analisis dinamik linear. Elemen garisan yang mewakili rasuk dan elemen permukaan yang mewakili *deck* jambatan telah dipilih sebagai model struktur.

Secara umumnya, kaedah unsur terhingga boleh menghasilkan banyak persamaan. Bilangan *eigenvalue* pula, bergantung pada bilangan persamaan tersebut. Biasanya nilai *eigenvalue* yang terendah yang akan dirujuk. Untuk kajian ini, hanya sepuluh nilai terawal frekuensi asli struktur jambatan yang akan dipertimbangkan menerusi perisian LUSAS 13.5

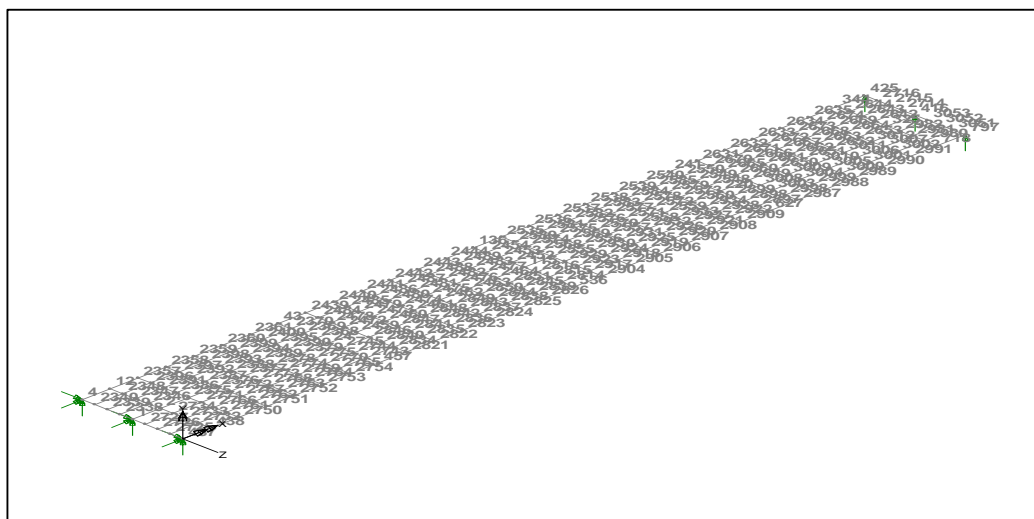
Keputusan yang diperolehi daripada analisis akan memberikan gambaran bagaimana struktur yang dianalisis bertindak dibawah getaran bebas.

5.1.1 Kedudukan Nod Pada Model



Rajah 5.1 : Kedudukan nod pada rasuk jambatan

Rajah 5.1 menunjukkan kedudukan nod pada elemen rasuk jambatan yang dimodel dengan kaedah unsur terhingga.



Rajah 5.2 : Kedudukan nod pada deck jambatan

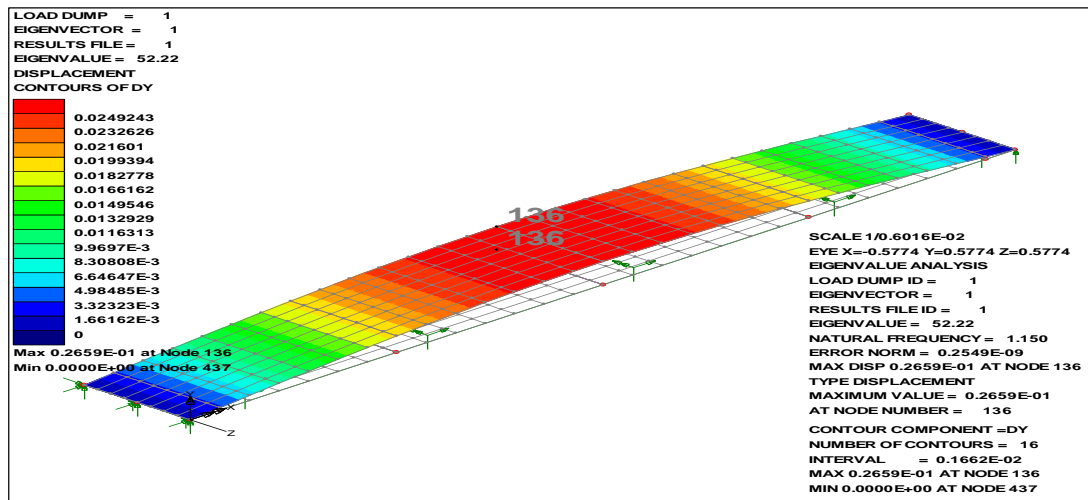
Rajah 5.2 menunjukkan kedudukan nod pada elemen *deck* jambatan yang dimodel dengan kaedah unsur terhingga.

5.2 Frekuensi Asli dan Bentuk Mod Jambatan

Frekuensi asli dan bentuk mod jambatan yang diperolehi diringkaskan dalam jadual berikut;

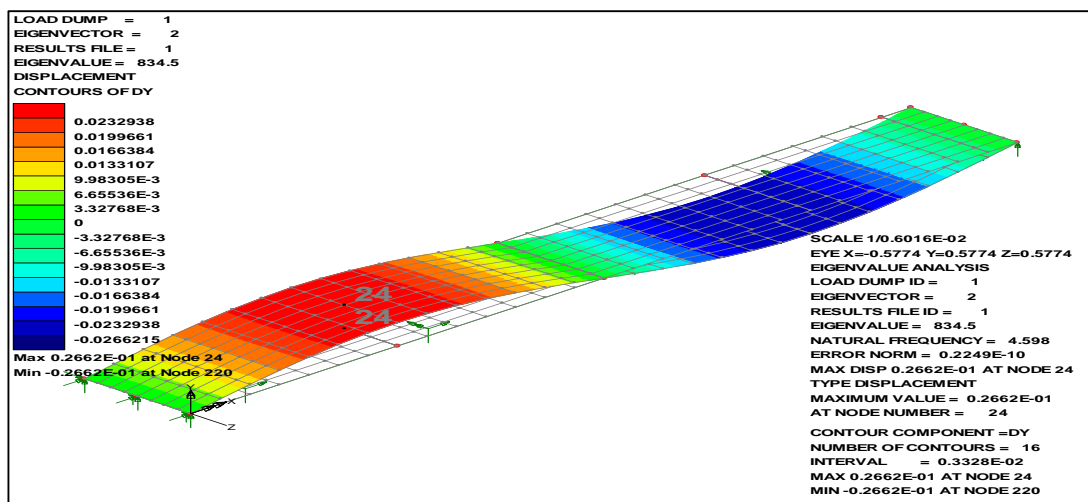
Jadual 5.1 : Frekuensi Asli bagi jambatan

Bentuk Mod	Frekuensi Asli (Hz)	Ciri-ciri Bentuk Mod
1	1.15	Lenturan dengan satu lengkungan
2	4.59	Lenturan dengan dua kelengkungan
3	4.90	Anjakan dua sisi menegak
4	8.60	Anjakan satu hujung mendatar
5	10.31	Lenturan dengan tiga kelengkungan
6	10.69	Dua bentuk kilasan / piuhan
7	18.06	Tiga bentuk kilasan / piuhan
8	18.91	Lenturan dengan empat kelengkungan
9	28.14	Lenturan dengan lima kelengkungan
10	29.73	Empat bentuk kilasan / piuhan



Rajah 5.2.1 : Bentuk Mod 1

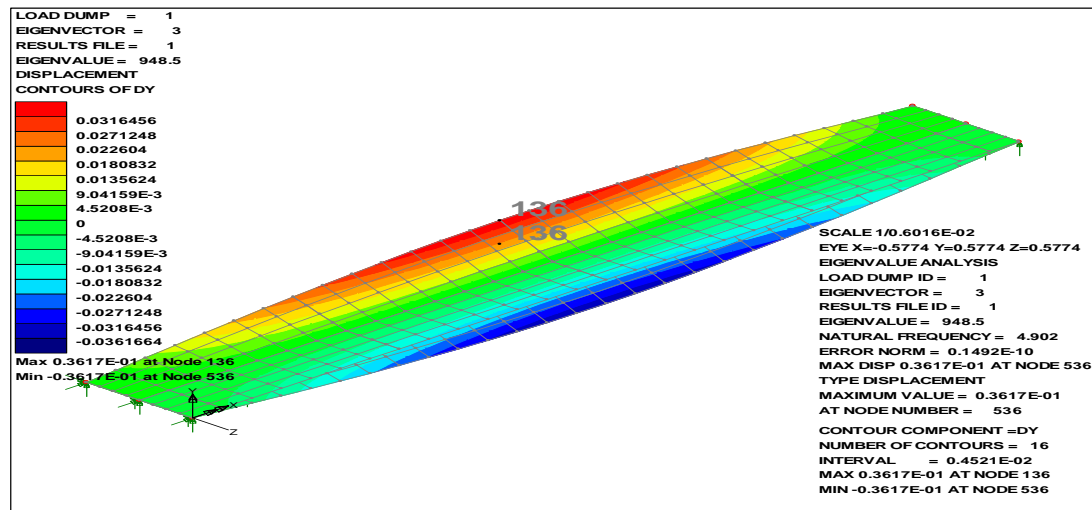
Rajah 5.2.1 menunjukkan bentuk mod 1 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 1.15 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah lenturan dengan satu kelengkungan. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0265m.



Rajah 5.2.2 : Bentuk Mod 2

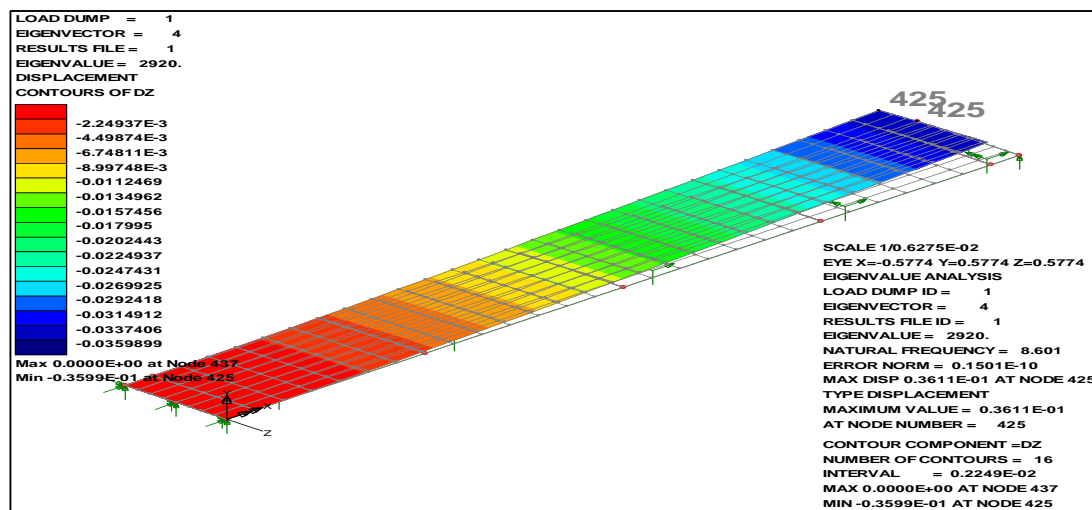
Rajah 5.2.2 menunjukkan bentuk mod 2 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 4.59 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah lenturan dengan

dua kelengkungan. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0266m.



Rajah 5.2.3 : Bentuk Mod 3

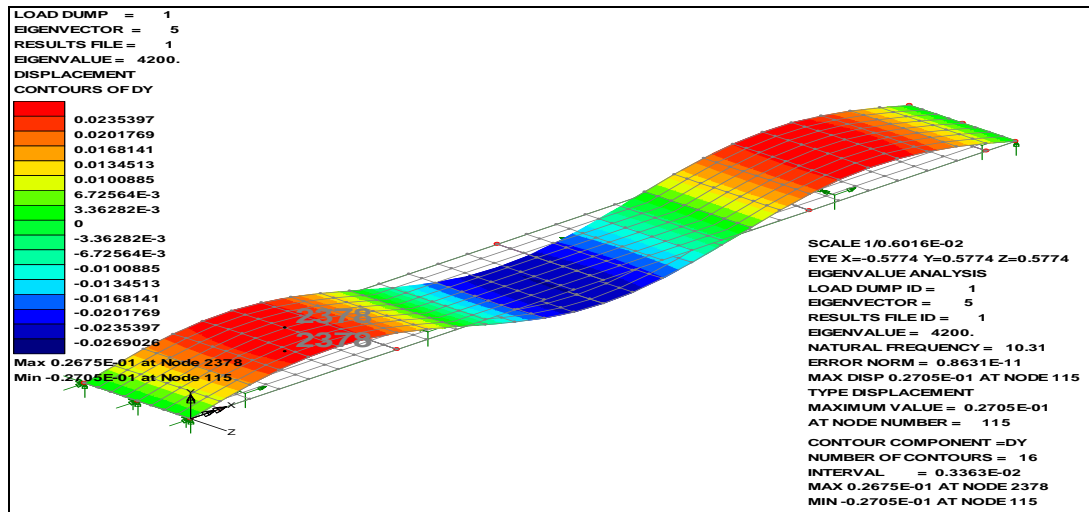
Rajah 5.2.3 menunjukkan bentuk mod 3 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 4.90 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah anjakan menegak dua sisi pada paksi global y. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0361m.



Rajah 5.2.4 : Bentuk Mod 4

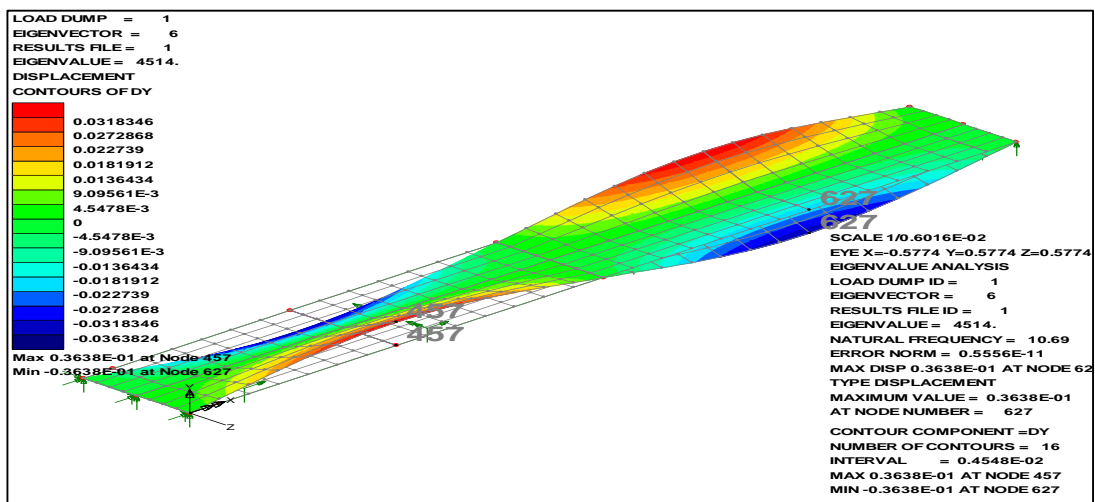
Rajah 5.2.4 menunjukkan bentuk mod 4 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 8.60 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah anjakan hujung

mendatar pada paksi global z. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0359m.



Rajah 5.2.5 : Bentuk Mod 5

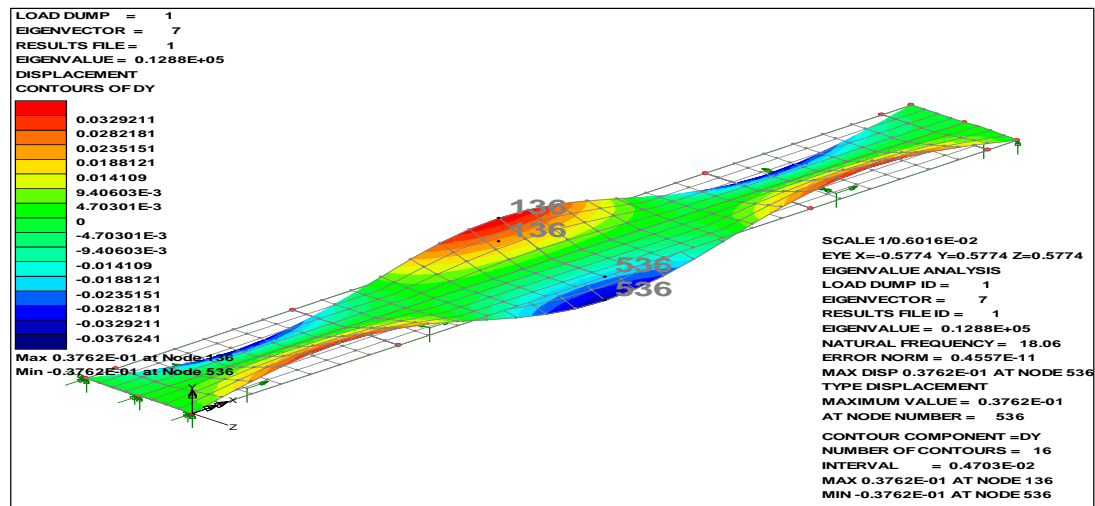
Rajah 5.2.5 menunjukkan bentuk mod 5 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 10.31 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah lenturan dengan tiga kelengkungan. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0267m.



Rajah 5.2.6 : Bentuk Mod 6

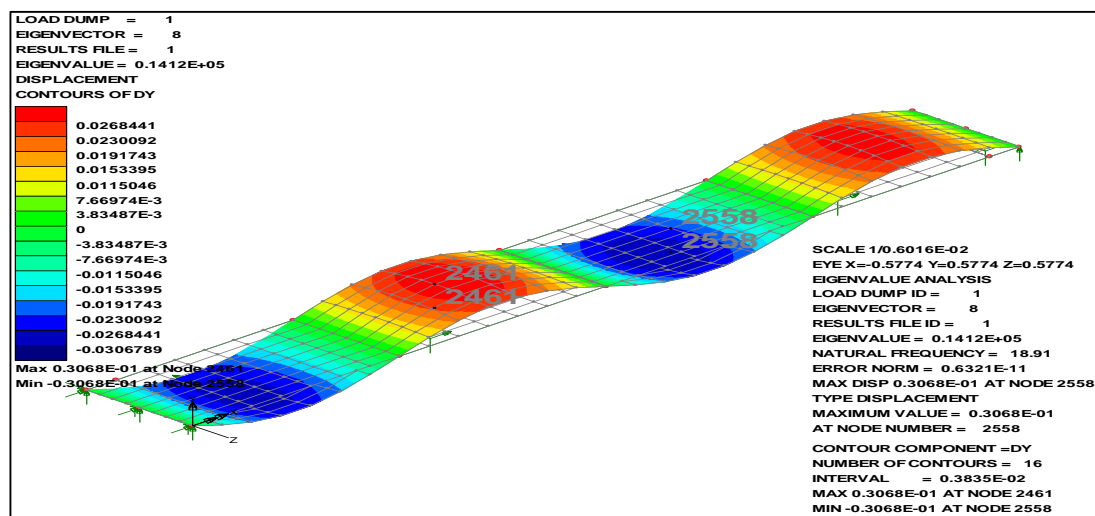
Rajah 5.2.6 menunjukkan bentuk mod 6 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 10.69 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah dua bentuk

piuhan. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0363m.



Rajah 5.2.7 : Bentuk Mod 7

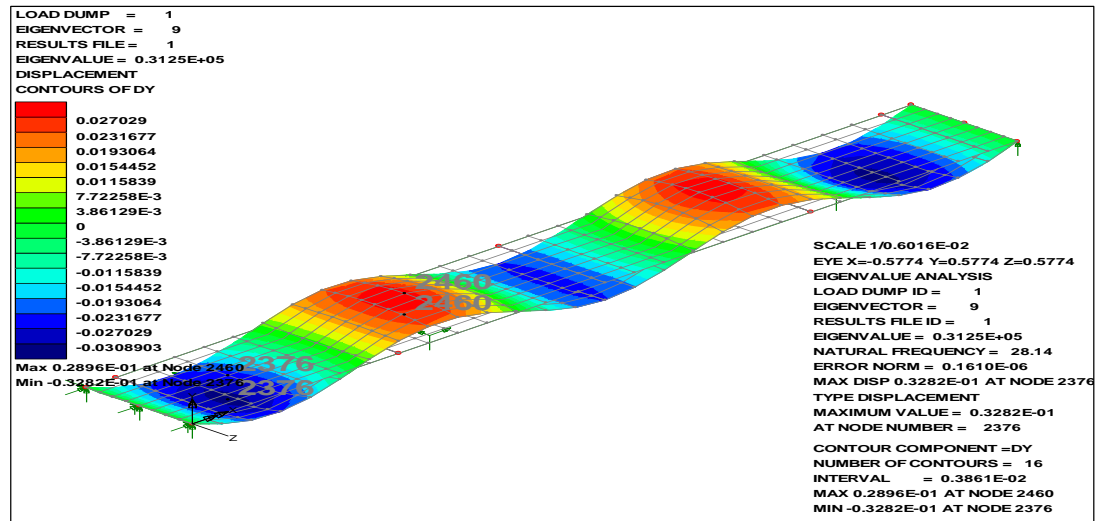
Rajah 5.2.7 menunjukkan bentuk mod 7 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 18.06 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah tiga bentuk piuhan. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0376 m.



Rajah 5.2.8 : Bentuk Mod 8

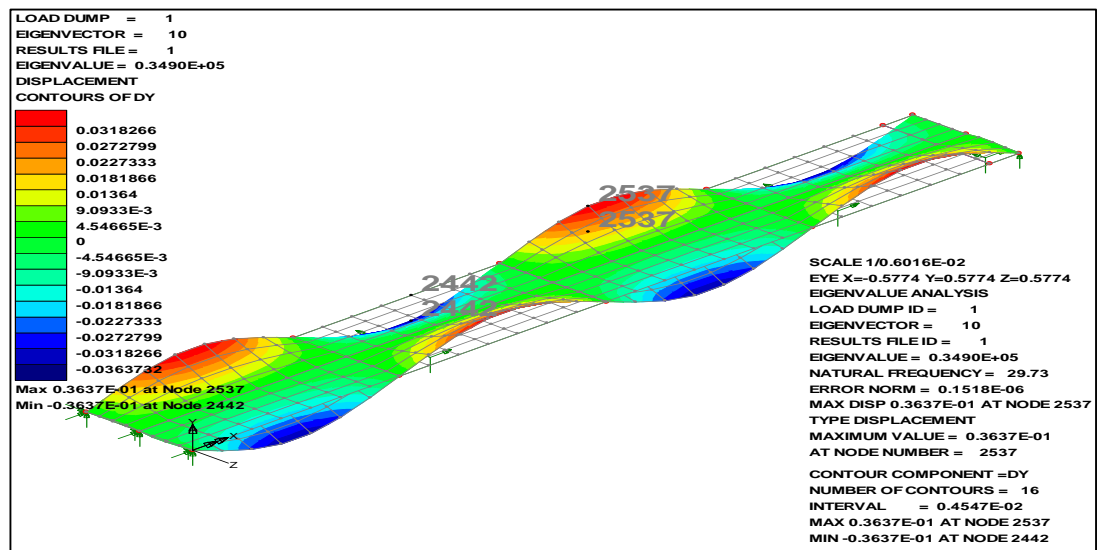
Rajah 5.2.8 menunjukkan bentuk mod 8 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 18.91 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah lenturan dengan

empat kelengkungan. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0306 m.



Rajah 5.2.9 : Bentuk Mod 9

Rajah 5.2.9 menunjukkan bentuk mod 9 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 28.14 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah lenturan dengan lima kelengkungan. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0326 m.



Rajah 5.2.10 : Bentuk Mod 10

Rajah 5.2.10 menunjukkan bentuk mod 10 bagi model jambatan. Frekuensi asli yang diperolehi adalah 28.14 Hz. Ciri-ciri bentuk mod pula adalah empat bentuk piuhan. Kontur pula menunjukkan magnitud anjakan, dengan anjakan maksimum 0.0363 m.

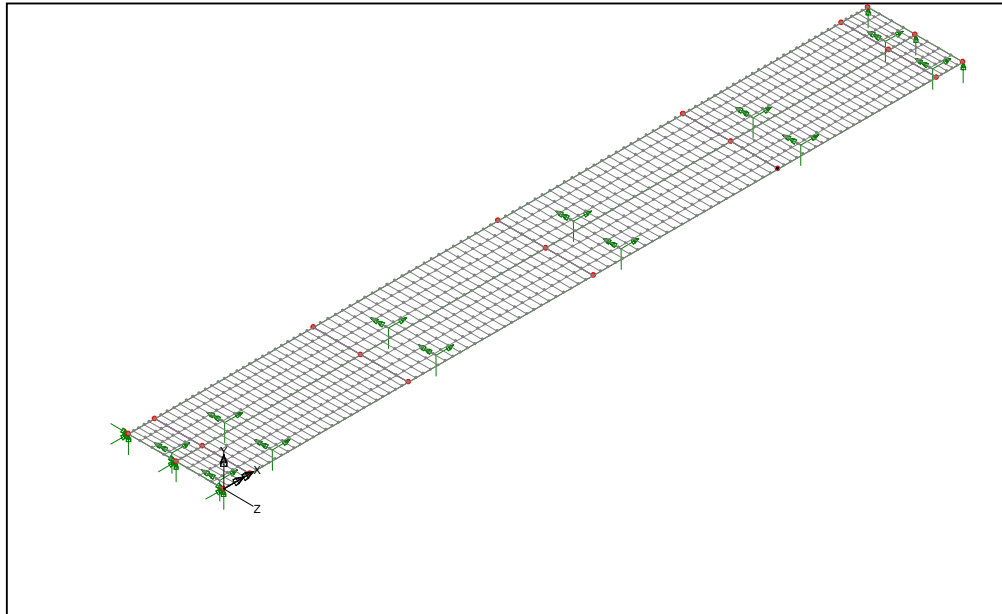
Daripada keputusan analisis, didapati frekuensi asli jambatan yang paling tinggi adalah 29.73 Hz dan frekuensi asli terendah pula adalah 1.15 Hz. Anjakan maksimum yang diperolehi pula adalah pada bentuk mod yang ke tujuh iaitu 0.0376 m. Didapati anjakan oleh jambatan ini sangat kecil, lebih kurang 4cm sahaja.

Apabila frekuensi asli bagi struktur jambatan ditentukan, bentuk mod untuk setiap frekuensi tersebut boleh diperolehi. Struktur jambatan bergetar pada setiap frekuensi asli dan amplitud getaran boleh diperolehi pada titik tertentu untuk setiap frekuensi tersebut. Daripada amplitud inilah bentuk mod akan dapat dikenalpasti. Bentuk mod juga ditakrifkan sebagai sifat ubahbentuk atau pesongan pada struktur. Bagi struktur darjah kebebasan berbilang, beberapa bentuk mod boleh diperolehi seperti mod piuhan, mod lenturan dan mod anjakan.

Dalam kajian ini, jambatan telah dimodel dengan ringkas, hanya mempertimbangkan struktur utama jambatan. Pengaruh *bracing* tidak diambilkira. Begitu juga dengan struktur kayu pemegang (*handrail*) pada sisi jambatan. Ini disebabkan perbezaan frekuensi asli antara model jambatan yang ringkas dan model yang kompleks adalah tidak ketara (Norshariza, 2005). Jika analisis memerlukan struktur dimodel mengikut keadaan sebenarnya, maka model yang kompleks adalah lebih sesuai digunakan. Bagaimanapun, untuk peringkat permulaan analisis, model yang ringkas dapat memberi keputusan yang memuaskan.

5.3 Perbandingan Frekuensi Antara Model Berlainan Saiz Elemen (*fine mesh vs course mesh*)

Bagi mendapatkan keputusan yang tepat, pembahagian elemen memainkan peranan yang sangat penting. Umumnya faktor-faktor seperti saiz elemen dan bilangan elemen akan mempengaruhi ketepatan keputusan. Bagaimanapun bagi menentukan frekuensi asli struktur, didapati penggunaan elemen yang besar (*course mesh*) akan memberi keputusan yang memuaskan. Ini boleh dibuktikan melalui analisis yang telah dijalankan pada jambatan yang sama dengan saiz elemen yang lebih kecil.



Rajah 5.3 : Pembahagian Elemen Kecil (*fine mesh*)

Jadual 5.2 : Perbandingan Frekuensi Asli Berlainan Saiz Elemen (Finer Mesh vs Coarse Mesh)

Bentuk Mod	Frekuensi Asli Hz		% Perbezaan $\left(\frac{a-b}{a}\right) \times 100$
	20 elemen pada arah paksi global x (a)	110 elemen pada arah paksi global x (b)	
1	1.15	1.15	0
2	4.59	4.59	0
3	4.90	4.90	0
4	8.60	8.57	0.35
5	10.31	10.26	0.48
6	10.69	10.69	0
7	18.06	18.03	0.17
8	18.91	18.73	0.95
9	28.14	27.74	0.15
10	29.73	29.62	0.37

Daripada keputusan yang diperolehi, didapati frekuensi asli antara kedua-dua model tidak jauh berbeza. Perbezaan yang sangat kecil ini, membuktikan penggunaan elemen yang besar tetapi bilangan yang kecil (*course mesh*) adalah memadai untuk menentukan frekuensi asli struktur jambatan.

5.4 Ujian *Impact Hammer* Pada Rasuk Konkrit

Bagi menggantikan ujian ditapak pada struktur jambatan yang dikaji, satu ujian berskala kecil telah dijalankan di Makmal Getaran Fakulti Kejuruteraan Mekanikal UTM. Ujian ini dijalankan terhadap sebatang rasuk konkrit. Tujuan ujian ini dijalankan adalah untuk membandingkan frekuensi asli yang diperolehi daripada ujian tersebut dengan frekuensi asli dari analisis.

5.4.1 Metodologi Ujian di Makmal



Rajah 5.4 : Pembahagian Rasuk

Sebelum memulakan ujian tersebut, rasuk dibahagikan kepada sepuluh bahagian untuk tujuan analisis unsur terhingga dan jarak ketukan. Peralatan yang digunakan untuk ujian tersebut terdiri daripada sebuah *accelerometer*, sebatang *impact hammer*, *power supply* untuk *accelerometer* dan alat capaian data

Accelerometer akan dilekatkan pada rasuk tersebut. Setelah itu, *Impact Hammer* akan digunakan untuk mencetuskan getaran pada rasuk. *Impact Hammer* akan diketuk disepanjang rasuk mengikut bahagian yang telah dibuat. Ketukan tidak boleh terlalu perlahan atau terlalu kuat agar getaran dapat dikesan oleh *accelerometer*. Untuk mendapatkan bacaan yang memuaskan, ketukan hendaklah dibuat disepanjang rasuk selari dan segaris dengan kedudukan *accelerometer*. Isyarat yang diterima oleh *accelerometer* dari lokasi ketukan yang berlainan boleh digunakan untuk menentukan bentuk mod. Isyarat dari *accelerometer* pula akan dipindahkan ke dalam komputer melalui alat capaian data.



Rajah 5.5 : Rasuk Konkrit, *Impact Hammer* dan *Accelerometer*

Sesuatu yang menarik tentang ujian ini adalah, rasuk tersebut diletakkan diatas span. Ini bermaksud rasuk tersebut tidak disokong atau dengan kata lain tidak mempunyai keadaan sempadan. Oleh hal yang demikian rasuk dikatakan sebagai struktur yang tidak stabil.



Rajah 5.5 : Rasuk diletak di atas span

5.4.2 Analisis Unsur Terhingga

Rasuk tersebut turut dianalisis dengan menggunakan perisian LUSAS13.5. Rasuk konkrit telah dimodel mengikut keadaan sebenarnya. Rasuk telah dimodel dengan menggunakan model *volume*. Elemen yang dipilih untuk analisis adalah elemen *stress* berbentuk heksahedral. Berikut merupakan data-data yang diperlukan untuk menjalankan analisis unsur terhingga.

Jadual 5.3 : Sifat-sifat Bahan Konkrit

Bahan Binaan	Modulus Young (kN/mm ²)	Nisbah Poisson ν	Ketumpatan (kg/ m ³)
Konkrit	24.59	0.1	2.45

Butir-butir mengenai rasuk konkrit pula adalah seperti berikut :

- a. Saiz = 150 x 100 x 750mm
- b. Kekuatan konkrit, f_{cu} = 30N/mm²
- c. Berat unit konkrit = 24 kN/ mm³
- d. Tempoh awetan = 14 hari

Keadaan sempadan tidak dipertimbangkan dalam rasuk ini sama seperti ujian dimakmal. Hanya 10 bentuk mod awal rasuk konkrit sahaja yang dipertimbangkan. Jadual berikut menunjukkan keputusan yang diperolehi daripada analisis dan ujian di makmal ;

Jadual 5.4 : Perbandingan Frekuensi Asli Antara Ujian di Makmal dan Analisis dengan LUSAS 13.5

Bentuk Mod	Frekuensi Asli Hz	
	Analisis dengan LUSAS 13.5	Ujikaji di Makmal
1	0.0000	299.66
2	0.0000	596.98
3	0.0000	663.67
4	0.0000	1.2009×10^3
5	0.0000	1.4959×10^3
6	0.20005×10^{-3}	1.5975×10^3
7	561.7	1.7964×10^3
8	793.9	207.63
9	1241	335.28
10	1476	667.81

Daripada keputusan yang diperolehi antara kedua-dua kaedah ujian dan analisis, setelah dibuat perbandingan, didapati terdapat perbezaan yang ketara antara frekuensi asli bagi sepuluh mod rasuk tersebut. Ini kemungkinan berpunca dari kesilapan dan ralat yang terjadi semasa melakukan ujian. Antara ralat yang boleh berlaku adalah :

1. Kesilapan mengambil bacaan.
2. Ketukan yang tidak seragam.
3. Span pada konkrit mungkin mengganggu dan menyerap getaran dan seterusnya mengganggu isyarat yang diterima *accelerometer*.
4. Terdapat tetulang bersaiz perangkai dalam rasuk konkrit. Ini mungkin menjejaskan keputusan analisis kerana pengaruh tetulang tidak diambilkira dalam analisis.

5. Kurang kemahiran dan pengalaman dalam menjalankan ujian. Latihan demi latihan perlu untuk dijalankan sebelum benar-benar bersedia menggunakan alat.
6. Alat *hammer* yang digunakan tidak sesuai untuk ujian terhadap struktur kejuruteraan awam. Oleh itu alat ujian yang dipilih hendaklah bersesuaian dan mampu berfungsi dengan struktur yang hendak dikaji.

BAB VI

KESIMPULAN DAN CADANGAN

6.1 Kesimpulan

Struktur jambatan telah dimodel dengan menggunakan kaedah unsur terhingga. Hanya komponen utama jambatan seperti rasuk dan *deck* kayu yang dipertimbangkan. Rasuk dimodel dengan menggunakan elemen garisan (*thick beam*) manakala *deck* kayu dimodel dengan elemen permukaan (*thick shell*).

Kajian ini dijalankan untuk menentukan frekuensi asli dan bentuk mod struktur jambatan. Hanya 10 mod terawal yang dipertimbangkan. Daripada keputusan analisis, didapati frekuensi asli jambatan yang paling tinggi adalah 29.73 Hz dan frekuensi asli terendah pula adalah 1.15 Hz. Anjakan maksimum yang diperolehi pula adalah pada bentuk mod yang ke tujuh iaitu 0.03762 m. Didapati anjakan oleh jambatan ini sangat kecil, lebih kurang 4cm sahaja. Bentuk mod yang dapat dilihat adalah, lenturan, piuhan dan anjakan sisi.

Dalam kajian ini juga, bagi kaedah unsur terhingga pembahagian struktur kepada elemen yang bersaiz besar dilihat dapat memberi keputusan yang memuaskan. Setelah dibuat perbandingan dengan pembahagian elemen yang kecil, didapati perbezaan frekuensi asli yang diperolehi adalah tidak ketara. Pembahagian struktur kepada elemen yang bersaiz besar juga dapat mempercepatkan proses analisis, seterusnya menjimatkan masa kajian.

Sebelum menjalankan ujian di makmal, prosedur ujian dan cara-cara penggunaan alat hendaklah diketahui dan dipelajari terlebih dahulu. Ini untuk memudahkan pengkaji menjalankan ujian tanpa menghadapi masalah. Seterusnya keputusan yang lebih memuaskan dapat diperolehi.

6.2 Cadangan

Struktur jambatan untuk kajian ini dimodel dengan ringkas. Untuk menentukan frekuensi asli dengan lebih tepat, dicadangkan jambatan dimodel mengikut keadaan sebenarnya iaitu dengan mengmbilkira keseluruhan komponen struktur.

Selain itu, maklumat dan lukisan perincian yang diperolehi juga adalah tidak mencukupi dan tidak tepat. Kajian ini banyak menggunakan anggapan sahaja seperti jarak antara rasuk, saiz rasuk dan keadaan sempadan. Oleh itu, maklumat, data dan lukisan perincian hendaklah lengkap bagi memudahkan proses analisis bagi menentukan frekuensi asli dengan tepat.

Untuk menentukan frekuensi asli struktur dengan lebih tepat lagi, maka ujian di tapak hendaklah dijalankan. Ini disebabkan keputusan yang diperolehi menerusi kaedah analisis kemungkinan tidak tepat. Keputusan yang diperolehi daripada ujian di tapak ini akan dibanding dengan keputusan daripada analisis. Maka adalah dicadangkan ujian di tapak dijalankan disamping kaedah analisis.

6.3 Sumbangan kajian

Projek ini boleh dijadikan asas kepada kajian yang lebih mendalam bagi analisis struktur (dinamik). Sumbangan yang diperolehi daripada projek ini adalah seperti di bawah:

1. Penggunaan kaedah unsur terhingga dalam proses memodel dan analisis.
2. Frekuensi asli sebagai parameter utama dalam analisis dinamik
3. Bentuk mod membayangkan tingkahlaku struktur pada frekuensi asli tertentu.
4. Kesan pembahagian elemen terhadap keputusan analisis.
5. Pendedahan kepada cara-cara dan prosedur ujian di makmal.

RUJUKAN

Anil K. Chopra, *Dynamics Of Structure : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2001.

Ayman, A.S., John, B.M., Stuart, S.C., and Amjad, J.A. (2001). "Ambient Vibration and Seismic Evaluation of a Cantilever Truss Bridge." *Journal of Bridge Engineering*.

Brownjohn J.M.W (1997), *Vibration Characteristics Of A Suspension Footbridge*, *Journal Of Sound And Vibration*, School Of Civil And Structure Engineering, Nanyang Technological University, Republic Of Singapore

Buccholdt H. (1997), *Structural Dynamics for Engineer*, Thomas Telford Publications, Thomas Telford Services Ltd. 1 Heron Quay, London E14 4JD

C.S. Huang, Y.B. Yang, L.Y. Lu, C.H. Chen. (1999) "Dynamic Testing and System Identification of a Multi-Span Highway Bridge." *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*

Chaallal O., (1998) M.Shahawy , *Experimental Evaluation Of Dynamic Amplifications For Evaluation Of Bridge Performance*, Department Of Construction Engineering, University Of Quebec, Montreal, Canada

Daniel J. Inman, *Engineering Vibration*, 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2000.

E.Hamid, Y. Frostig, *Free Vibration of Cracked Prestressed Concrete Beam*, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion- Israel Institute of Technology, 32000 Haifa, Israel, 2004

Fryba L., Pirner M. (1999), *Load Test and Modal Analysis of Bridges*, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Science of the Czech Republic, Prosecki 76, CZ-190 00 Prague 9, Czech Republic

Gary C. Hart, Kevin Wong, *Structurals Dynamics for Structural Engineers*, John Wiley & Sons, Inc. 1999

H. Bucholdt, *Structural Dynamics For Engineers*, Thomas Telford, Heron Quay, London, 1997

Hamid, E. and Frostig, Y. (2004). "Free Vibration of Cracked Prestressed Concrete Beam." Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion- Israel Institute of Technology, 32000 Haifa, Israel

Huang, C.S. (1999). "Dynamic Testing and System Identification of a Multi-Span Highway Bridge." *Journal of Bridge Engineering*.

J. Maeck, G.D. Roeck. (2003) "Damage Assessment Using Vibration Analysis on The Z24-Bridge." *Journal Mechanical System and Signal Processin*

J.R.Maguire , T.A.Wyatt, *Dynamics an introduction for civil engineering and structural engineers*, Thomas Telford, Heron Quay, London, 2000

J.R.Maguire , T.A.Wyatt, *Dynamics an introduction for civil engineering and structural engineers*, Thomas Telford, Heron Quay, London, 2000

J.R.Maguire, T.A.Wyatt, *Dynamics an Introduction for Civil Engineering and Structural Engineers*, Thomas Telford, Heron Quay, London, 2000

Jagmohan L. Mohar, *Dynamic Of Structures*, 2nd edition., Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, 2002

John B. Barefoot, Furman W. Barton, Thomas T. Baber, Wallace T. Mckeel Jr. (1997), *Development of Finite Element Models To Predict Dynamic Bridge Response*, Final Report University of Virginia

K.C. Womack, M.W. Halling. (1999) "Forced Vibration Testing Of The I-15 South Temple Bridge." Phase 1 Final Report

L. Fryba, M. Pirner, *Load Tests and Modal Analysis of Bridge*, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Science of the Czech Republic, 1999

Mohd Yunus Abdullah (2003). "Modul Mekanik Mesin." Jabatan Mekanik Gunaan, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Johor

N. Kurata, T. Kobori, M. Takahashi, T. Ishibashi, N. Niwa, J. Tagami, H. Midorikawa. (2000). "Forced Vibration Test of a Building With Semi-Active Damper System." *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*

Noor Aishah Binti Zaharin, *Kelakunan Bangunan di Bawah Beban Gempa Bumi*, tesis Projek Sarjana Muda, Fakulti Kejuruteraan Awam, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Johor, 2001/02

Norshariza Mohamad Bhkari (2005), *Modal Analysis Of Concrete Bridge Decks Subjected To Free Vibration*, Msc Dissertation UTM Skudai

Ponselvi a/p Jeeragam (1998), *Kesan-Kesan Getaran Ke Atas Struktur Kejuruteraan Awam*, Projek Sarjana Muda UTM Skudai

R.J. Steffens, *Structural Vibration and Damage*, Department of the Environment Building Research Establishment, Her Majesty's Stationery Office London, 1974

R.J. Steffens, *Structural Vibration and Damage*, Department of the Environment Building Research Establishment, Her Majesty's Stationery Office London, 1974

Roeck G. De, Peeters B., Maeck J. (2000), *Dynamic Monitoring of Civil Engineering Structures*, Department of Civil Engineering K. U Leuven, Leuven, Belgium

T. Saito, K. Shiba, K. Tamura. (2001) "Vibration Control Characteristic of a Hybrid Mass Damper System Installed in Tall Buildings." *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*

W.L. Schulz, J.P.Conte, E. Udd, J.M. Seim. (2000) "Static and Dynamic Testing of Bridges and Highways using Long-gage Fiber Bragg Grating Based Stain Sensors."

W.N. Patten, J. Sun, G. Li, J. Kuehn, G. Song. (1999) "Field Test of an Intelligent Stiffener For Bridges At The I-35 Walnut Creek Bridge." *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*

Y.L. Han, Q.S. Li, Ai-Qun Li, A.Y.T. Leung, P.H.Ling. (2003) "Structural Vibration Control by Shape Alloy Damper." *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*

APPENDIKS

LAMPIRAN

1. Perbezaan antara beban angin dan gempabumi (*J.R.Maguire , T.A.Wyatt 2000*)

Characteristics	Wind	Earthquake
Source of loading	External force due to wind pressure.	Applied base motion from ground vibration.
Type of loading	Windstorm of several hours duration. Load fluctuate, but are predominantly in one direction	Transient cyclic load of at most a few minutes total duration. Load change repeatedly in direction.
Influences of soil conditions	Small effect on dynamic sensitivity.	Soil conditions can be very important.
Main factors affecting building response	External shape of building or structure. Generally only global dynamic properties are important. Dynamic considerations affect only small fraction of building structure.	Response is governed by global dynamic properties (fundamental period, damping and mass) but plan and vertical regularity of structure also important. All structure are affected dynamically.
Normal design basis	Elastic Response is required	Inelastic response is usually permitted, but ductility must be provided.
Design of non-structural elements	Applied loading is concentrated on external cladding.	Entire building contents is shaken and must be appropriately designed.

3. Komponen Jambatan



Struktur Bawah Jambatan Di Tasik Utm



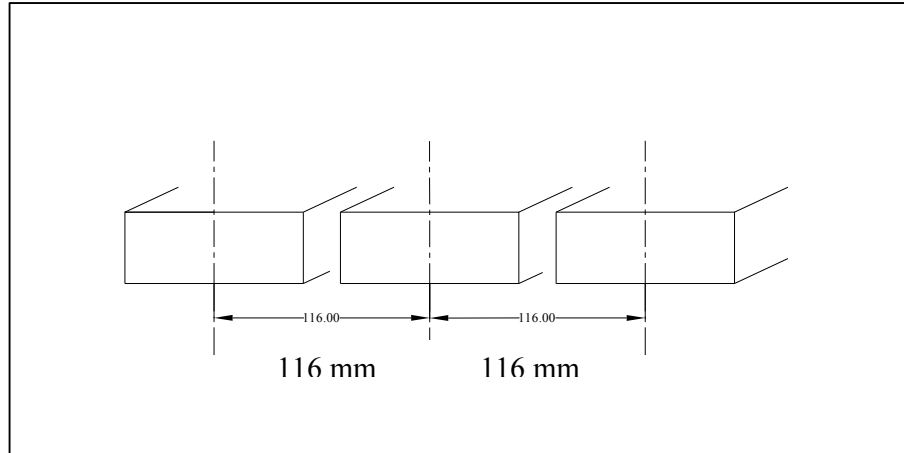
Struktur *Bracing* Pada Rasuk Jambatan Di Tasik Utm



Rectangular Hollow Section (RHS) yang berfungsi sebagai rasuk kedua dan *bracing*.

4. Butir-butir Struktur Pada Jambatan

a. *Deck Kayu*

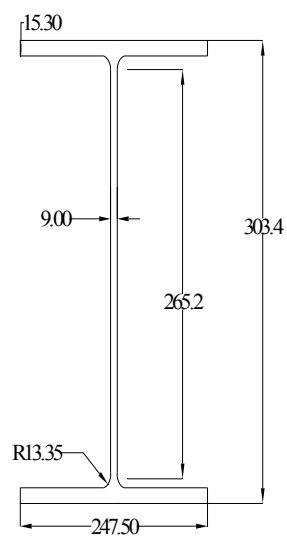


Jumlah *deck* kayu = 121

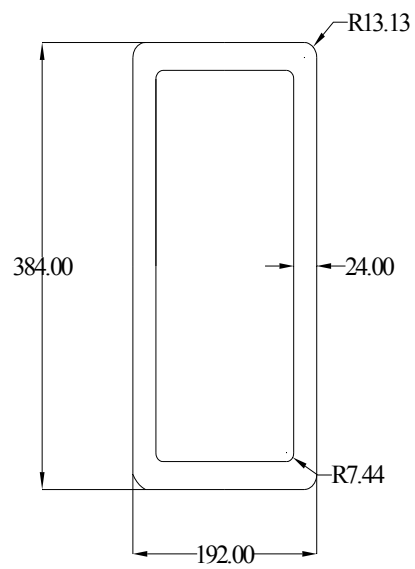
Saiz *deck* kayu B x H = 40 x 96 mm

Jarak antara *deck* kayu (mm) = 116

b. *Rasuk Keluli* (305 x 165 x 40)mm



c. **Rasuk Keluli (160x80x10)mm**

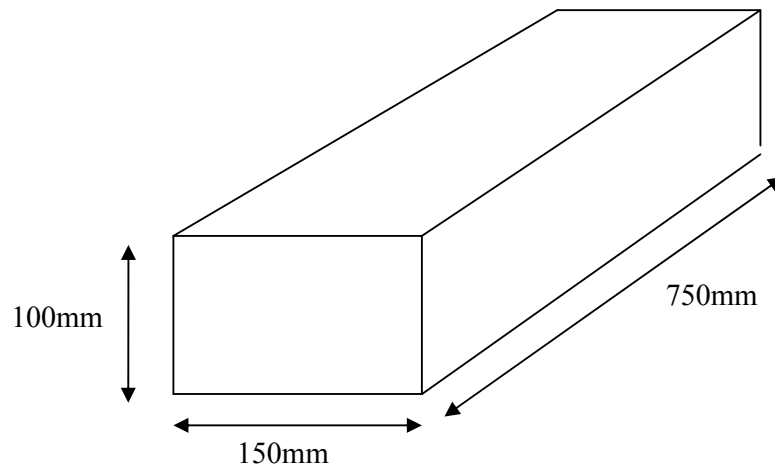


5. ***Impact Hammer Test***

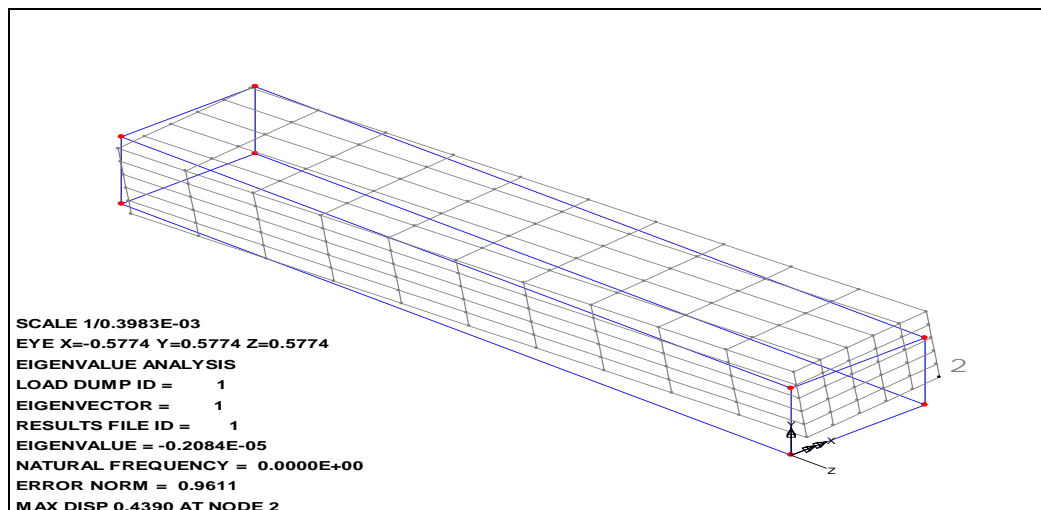


Ujian Impact Hammer di Makmal Getaran Fakulti Mekanikal UTM Skudai

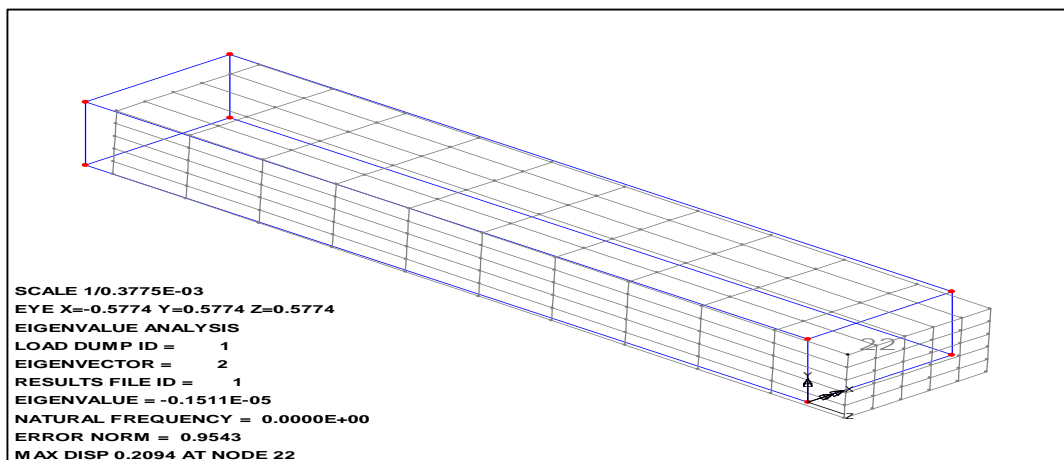
6. Saiz dan Dimensi Rasuk Konkrit



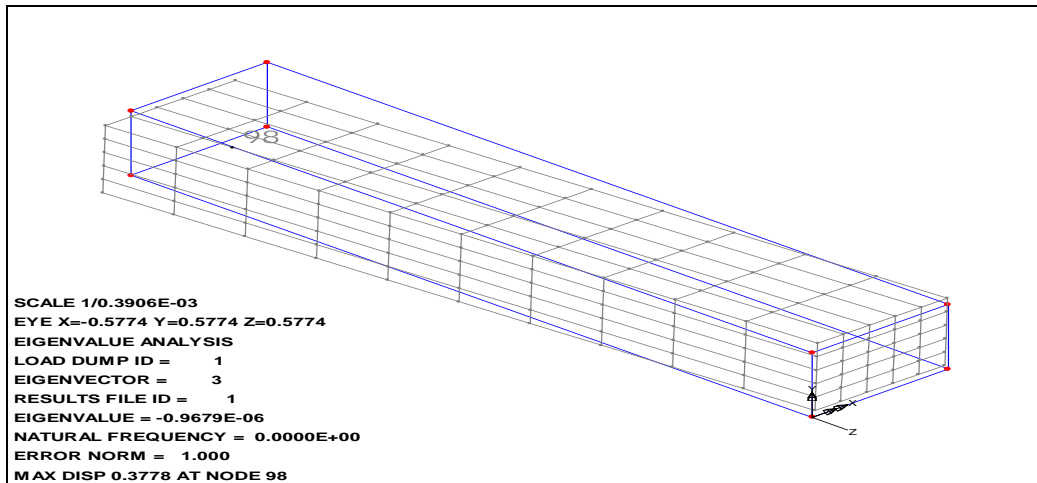
7. Keputusan Analisis Bagi 10 Mod Rasuk Model 150 x 100 x 750



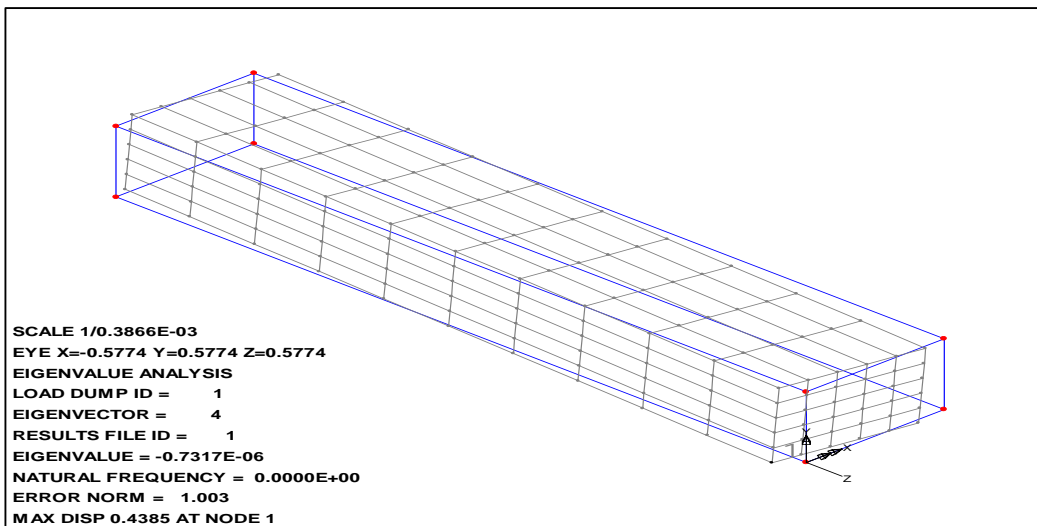
Bentuk Mod 1



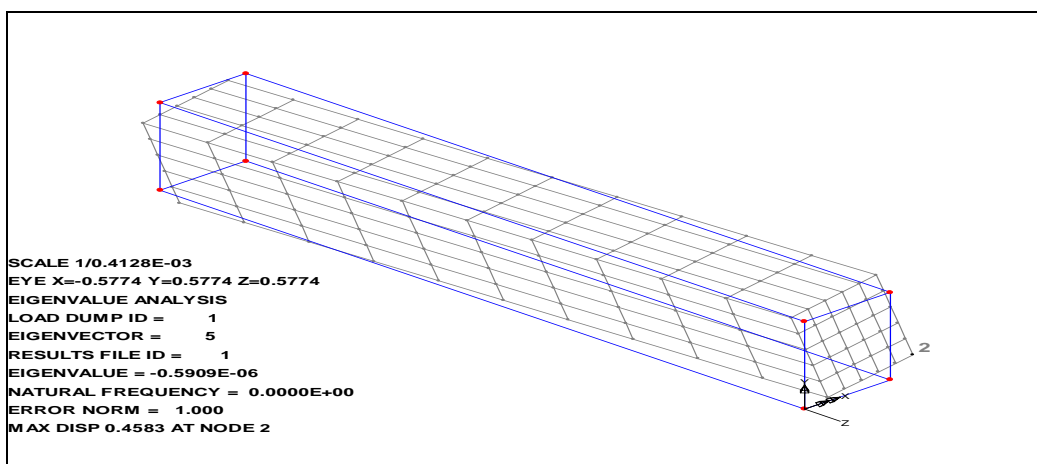
Bentuk Mod 2



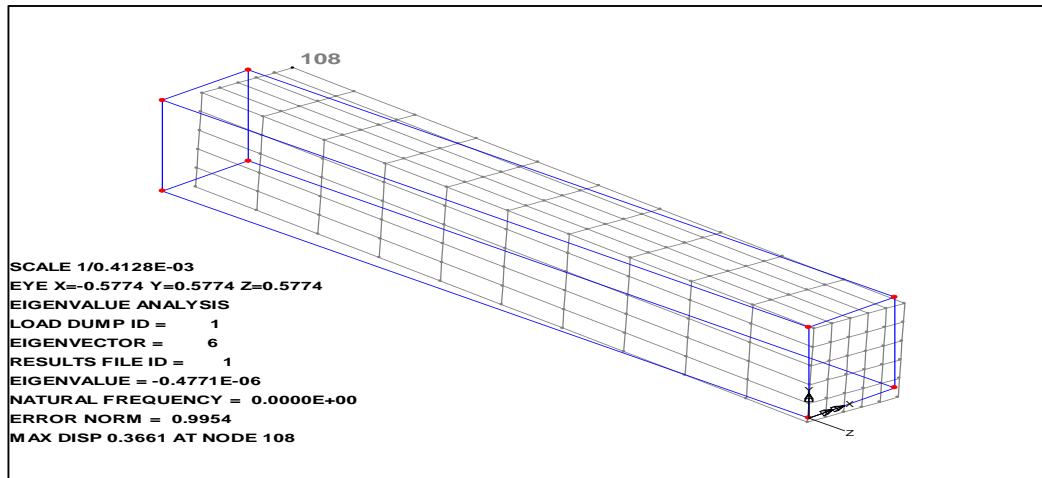
Bentuk Mod 3



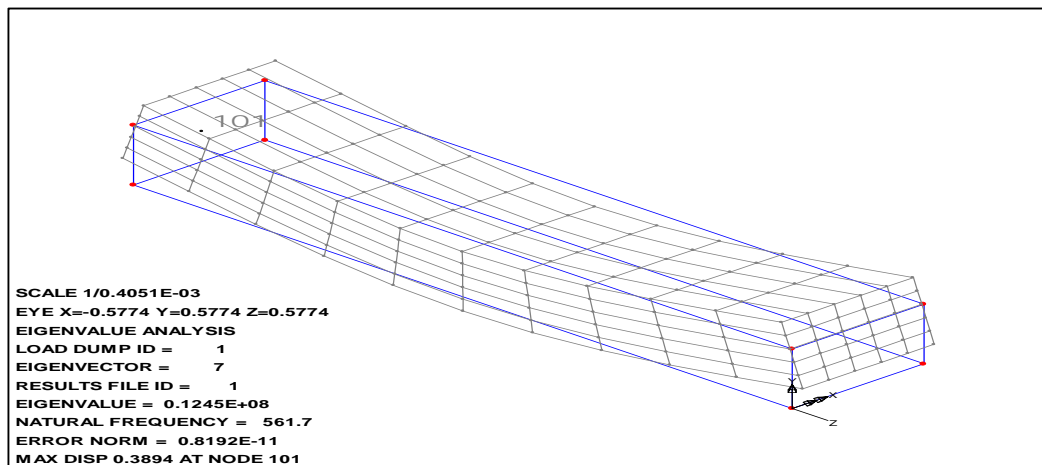
Bentuk Mod 4



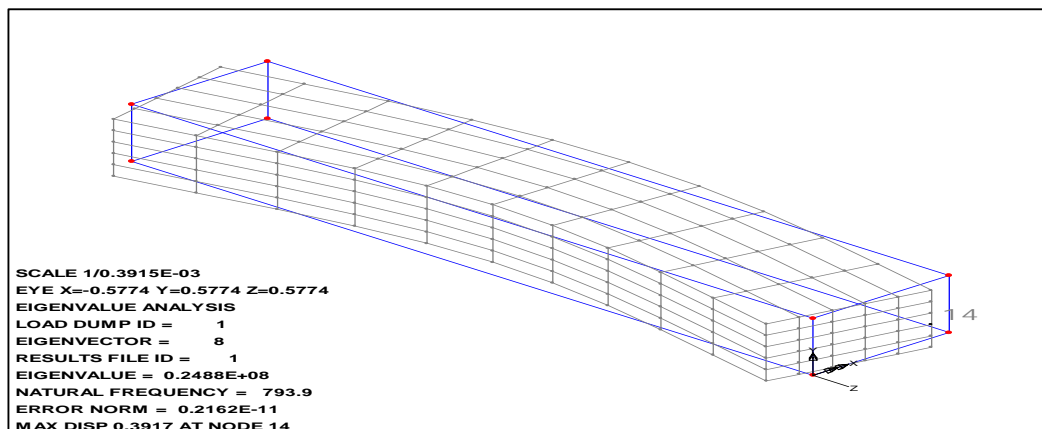
Bentuk Mod 5



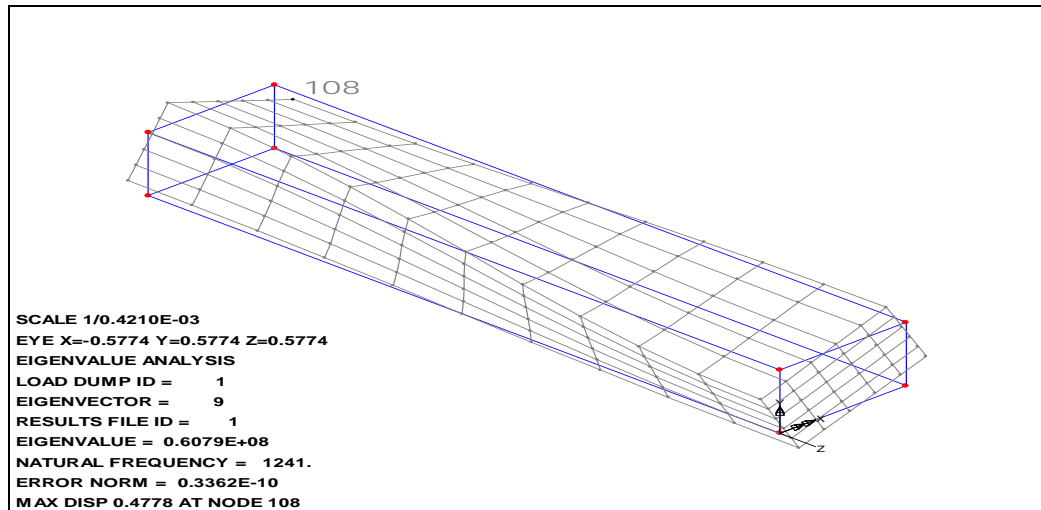
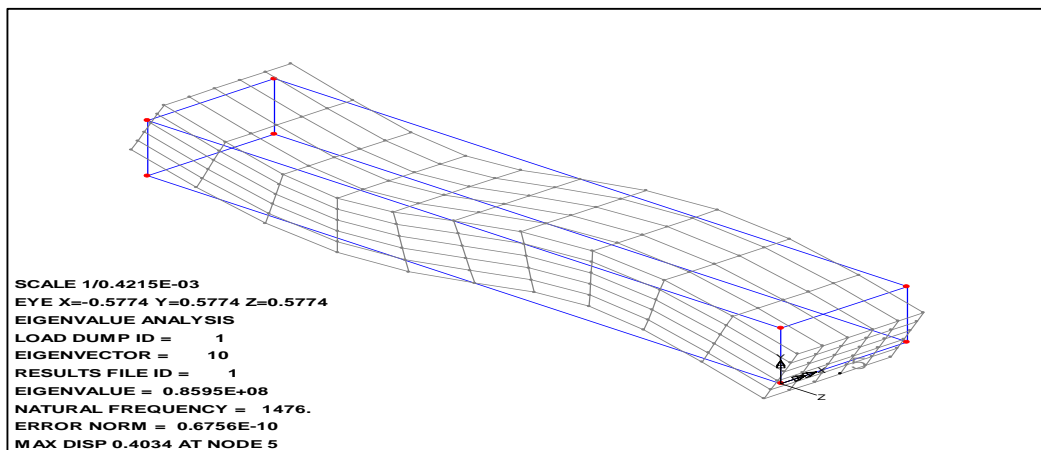
Bentuk Mod 6



Bentuk Mod 7



Bentuk Mod 8

**Bentuk Mod 9****Bentuk Mod 10**