

**STUDI KINERJA PELAT DAN BALOK BETON BERTULANG DI GEDUNG E
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG
AKIBAT GETARAN**

(SKRIPSI)

Oleh:
DHEA YULIA RESMONIDA
1615011031



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2020**

ABSTRAK

STUDI KINERJA PELAT DAN BALOK BETON BERTULANG DI GEDUNG E FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG AKIBAT GETARAN

Oleh

DHEA YULIA RESMONIDA

Pada umumnya lantai gedung perkuliahan akan mengalami beban hidup yang berasal dari berbagai aktivitas di atasnya. Pergerakan beban hidup di atas lantai ini akan menghasilkan getaran pada struktur lantai dan dapat menimbulkan ketidaknyamanan bagi pengguna gedung.

Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi getaran lantai ruang kelas dengan metode pengujian di lapangan dan analisis numerik menggunakan *Software SAP2000*. Untuk perhitungan mengacu pada peraturan ISO 2631-2 : 2003 dan Steel Design Guide 11th Series “Floor Vibration due to Human Activity”.

Berdasarkan hasil pengujian lapangan, didapatkan kuat tekan beton pelat dan balok bertulang antara K-350 dan K-400 termasuk karakteristik beton mutu sedang dan didapatkan frekuensi pelat lantai berkisar 12,94 – 23,29 Hz dengan akselerasi antara 0,235 – 1,13 m/s². Sedangkan berdasarkan analisis numerik didapatkan hasil frekuensi getaran sebesar 8,0515 Hz dan frekuensi akibat beban berjalan sebesar 8,13 Hz dengan akselerasi frekuensi alami dibawah 0,5%g sehingga struktur tersebut kaku.

Kata kunci : Balok, pelat, getaran dan akselerasi.

ABSTRACT

STUDY OF VIBRATION PERFORMANCE ON REINFORCED PLATE-BEAMS IN E BUILDING ENGINEERING FACULTY UNIVERSITY

By

DHEA YULIA RESMONIDA

In General, the plate of building will restrain the live load from various activities on it. Furthermore, this live load may produce structural vibrations which cause the inconvenient condition for the users.

The study aims to evaluate the vibrations of the plate based on testing on field and numerical analysis using SAP2000 Software. The analysis calcutions according to ISO 2631-2 : 2003 and steel design guide 11th series floor vibrations due to human activity.

The measurement on field shows that the compression strength of reinforced concrete for the plate and beams are between K-350 and K-400 which means both of them are medium quality concrete in addition. The frequencies of plate are between 12,94 - 23,29 Hz with the acceleration rates of 0,235 - 1,13 m/s². The numerical analysis results that the frequences of plate in 8,0515 Hz and 8,13 Hz frequences due to walking load with the accelerations under 0,5% g. Based on both of analysis is concluded that the plate E building is a rigid structure.

Key words: Beam, plate, vibrations and acceleration

**STUDI KINERJA PELAT DAN BALOK BETON BERTULANG DI GEDUNG E
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG
AKIBAT GETARAN**

Oleh:

DHEA YULIA RESMONIDA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2020**

Judul Skripsi

**: STUDI KINERJA PELAT DAN BALOK
BETON BERTULANG DI GEDUNG E
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS
LAMPUNG AKIBAT GETARAN**

Nama Mahasiswa

: Dhea Yulia Resmonida

Nomor Pokok Mahasiswa : 1615011031

Program Studi

: Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

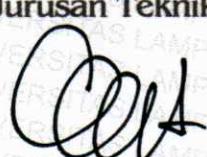

Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.

NIP 19700430 199703 1 003

Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.

NIP 19720308 199802 1 004

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil


Gatot Eko Susilo, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIP 19700915 199503 1 006

3. Ketua Prodi Teknik Sipil


Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.

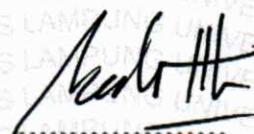
NIP 19720829 199802 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Pengudi

Ketua

: **Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.**



Sekretaris

: **Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.**



Pengudi

Bukan Pembimbing : **Hasti Riakara Husni, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU, ASEAN, Eng.

NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 1 Juli 2020

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Skripsi dengan judul Studi Kinerja Pelat dan Balok Beton Bertulang di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran adalah bagian dari penelitian dosen bapak Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil., bapak Masdar Helmi, S.T., D.E.A. dan ibu Vera Agustriana Noorhidana, S.T., M.T. berjudul Mitigasi Resiko Akibat Bencana Gempa Melalui Kajian Kapasitas Struktur Gedung Perkuliahannya di Fakultas Teknik dengan Sensor Akuisisi Data Getaran dimana saya ikut dalam penelitian dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai tata etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiarisme.
2. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada para dosen peneliti tersebut dan Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya dan saya sanggup dituntut sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, Juli 2020



Dhea Yulia Resmonida

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Pringsewu, 29 Mei 1998. Penulis merupakan anak pertama dari Bapak Yuli Ismar dan Ibu Roliawati. Penulis memiliki 2 orang adik yang bernama Dhella Anisa Reforma dan Dhengga Sultan Amanah.

Penulis memulai pendidikan Taman Kanak-Kanak di TK Pembina Tanggamus dan melanjutkan pendidikan sekolah dasar di SD Negeri 2 Perumnas Way Halim Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2010, Pada tahun 2013 penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 19 Bandar Lampung, dan melanjutkan Sekolah Menengah Atas di MAN 1 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2016. Pada tahun 2016 penulis di terima sebagai mahasiswa fakultas teknik jurusan teknik sipil.

Pada April 2019 penulis mengikuti Kerja Praktik pada saat pembangunan Embung Konservasi Universitas Lampung dan pada Januari-Maret 2020 mengikuti Kuliah Kerja Nyata di pekon Sukananti, Way Tenong Kabupaten Lampung Barat. Penulis telah menyelesaikan tugas akhir penelitian dengan judul Studi Kinerja Pelat dan Balok Beton Bertulang di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat getaran. Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung (HIMATEKS) sebagai anggota Departemen Usaha dan Karya pada periode 2018/2019.

PERSEMBAHAN

Alhamdulilahhirabbilalamin. Kuucapkan Syukur atas Karunia-Mu Akhirnya saya dapat menyelesaikan sebuah karya yang semoga menjadikanku insan yang berguna, bermanfaat dan bermartabat. Aku Persembahkan karya sederhana ini

Untuk Kedua orang tuaku yang sangat aku cintai. Untuk ayah dan ibuku yang telah merawat dan memberikan dukungan materi serta moril dan spiritual. Terimakasih untuk kesabarannya dalam membimbing dan memberikan arahan serta nasihat yang berguna.

Terimakasih telah membeberikan pelajaran hidup yang sangat berharga.

Untuk adik-adikku yang selalu mensuport dan bersabar selama masa kuliah aku. Untuk sahabat-sahabatku yang telah mendukungku dan telah menjadi tempat untuk berbagi cerita dan tempat berkeluh kesah.

Terima kasih untuk abang-abang, mba-mba dan adik-adik lingkungan Teknik Sipil Unila yang selalu ada di tiap harinya menemani waktu kuliah. Untuk para dosen yang tak hentinya memberikan ilmu pengetahuan, arahan serta bimbingannya.

Terima kasih untuk teman-teman keluarga besar serta sahabatku angkatan 2016 atas dukungannya dalam proses yang sangat panjang ini. Menemani perjalanan kuliah dari awal hingga akhir studi. Banyak kenangan yang telah kita lalui bersama. Dan untuk mahasiswa lainnya khususnya Jurusan Teknik Sipil yang sedang mengalami proses ini untuk tetap optimis dan semangat dalam mengerjakan skripsi agar dapat membangun nusa dan bangsa agar lebih baik dan menjadi generasi muda yang cerdas dan berpendidikan.

MOTTO

“Sesungguhnya setelah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari satu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh urusan yang lain. Dan hanya kepada Tuhanmulah hendaknyakamu berharap”

(QS.Al-Insyirah:6-8)

“The Way Get Started Is To Quit Talking And Begin Doing”

(Walt Disney)

“*Everything will be okay in the end, if it is not okay, it is not the end*”

(John Lennon)

SANWACANA

Dengan mengucap syukur Alhamdulillah dan atas berkat rahmat serta hidayah Allah S.W.T., penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Kinerja Pelat dan Balok Beton Bertulang di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran” sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana Teknik Sipil di Universitas Lampung. Diharapkan dengan selesainya skripsi ini, Penulis dapat memberikan hasil tentang getaran yang berlebihan pada gedung sebagai referensi dan pengembangan ilmu pengetahuan di bidang struktur. Pada penyusunan laporan ini penulis banyak mendapatkan bantuan, dukungan, bimbingan, dan pengarahan dari berbagai pihak. Untuk itu, Penulis mengucapkan terima kasih setinggi-tingginya kepada:

1. Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN. Eng., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Gatot Eko Susilo, S.T, M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.
3. Masdar Helmi, S.T., D.E.A, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Utama, atas ijin menggunakan hasil penelitiannya, serta kesediaan waktunya memberikan bimbingan dan pengarahan dalam proses penyelesaian skripsi ini.
4. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil., selaku Dosen Pembimbing Kedua, atas ide penelitian serta kesediaan waktu, arahan dan bimbingan serta dukungannya dalam proses penyelesaian skripsi ini.

5. Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., selaku Dosen Pengaji atas waktunya serta kritik dan saran yang diberikan dalam proses penyelesaian skripsi ini.
6. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku dosen Pembimbing Akademik atas arahan selama masa perkuliahan.
7. Semua dosen jurusan Teknik Sipil yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat dalam proses pembelajaran dan wawasan untuk lebih baik kedepannya.
8. Kedua orang tuaku tercinta Ayah Yuli Ismar, mami Roliawati, serta keluarga besar dan adikku yang telah memberikan dorongan materil dan spiritual dalam menyelesaikan skripsi ini.
9. Blackpink, CrazyRich, BYCR, Mie Ayam Squad, MTTDS, dan Yogi yang selalu ada di lingkunganku memberikan semangat dan motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Silsila Janna Firdasa teman seperjuangan penelitian serta Mayka dan Kabul, terima kasih atas bantuan, kerja sama, saran, dan kritik selama penelitian berlangsung.
11. Keluarga besar angkatan 2016 yang menemani, memberikan semangat dan dukungan yang luar biasa dalam proses penyelesaian skripsi ini.
12. Abang – abang dan adik – adik lingkungan Teknik Sipil Unila yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna oleh sebab itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan agar sempurnanya laporan ini dikemudian hari. Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat.

Bandar Lampung, Juli 2020

Penulis

Dhea Yulia Resmonida

DAFTAR ISI

Halaman

SANWACANA	i
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang.....	1
B. Tujuan Penelitian.....	3
C. Manfaat Penelitian.....	3
D. Batasan Masalah	3

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Struktur Beton Bertulang	5
B. Pelat	6
C. Balok Beton Bertulang	8
D. Beban Dinamis	9
E. Getaran.....	10

1. <i>Natural Frequency</i>	10
2. <i>Walking Vibration</i>	12
F. Penelitian Terdahulu	13
1. Penelitian pada Struktur Beton Bertulang	13
2. Penelitian pada Struktur Komposit.....	14

III. METODE PENELITIAN

A. Metode Eksperimental	16
1. <i>Hammer Test</i>	17
2. <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>	18
3. <i>Accelerometer</i>	20
B. Metode Numerik	20
C. Lokasi Penelitian.....	21
D. Data Penelitian	22
E. Teknik Pengumpulan Data.....	23
F. Diagram Alir Penelitian	24

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pembahasan Metode Eksperimental	25
1. Hasil Pengujian <i>Hammer Test</i>	26
2. Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV)	29
3. Hasil Pengujian <i>Acceleration</i>	34
B. Metode Numerik	39
1. Permodelan Struktur SAP 2000 Ver.14	39

2. Kolom	40
3. Balok dan Pelat	41
4. Akibat Beban Berjalan di Atas Pelat Lantai	42
C. Hasil Perhitungan.....	45

V. PENUTUP

A. Kesimpulan.....	46
B. Saran.....	47

DAFTAR PUSTAKA.....48

LAMPIRAN A. DOKUMENTASI PENELITIAN.....51

LAMPIRAN B. *FLOOR VIBRATION*.....58

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Tebal Minimum Pelat Tanpa Balok Interior.....	8
2. Pembacaan Kriteria Hasil Pengujian UPV.....	20
3. Hasil Pengujian <i>Hammer Test</i> Pada Kolom.....	27
4. Hasil Pengujian <i>Hammer Test</i> Pada Balok.....	28
5. Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity Balok</i>	30
6. Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> Kolom.....	30
7. Perhitungan Metode <i>Direct</i> Pada Kolom.....	31
8. Perhitungan Metode <i>Indirect</i> Pada Kolom.....	32
9. Perhitungan Metode <i>Indirect</i> pada Balok 1	33
10. Perhitungan Metode <i>Indirect</i> pada Balok 2	33
11. Hasil Metode Eksperimental Dan Numerik.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Pelat satu arah.....	7
2. Pelat dua arah.....	7
3. Rekomendasi ketinggian akselerasi kenyamanan manusia akibat getaran <i>(Steel Design Guide Series 11, ISO 2631-2 : 2003)</i>	13
4. <i>Hammer Test</i> untuk uji kuat tekan beton.....	18
5. <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> pengujian kuat beton eksisting.....	19
6. <i>Accelerometer</i> untuk pengujian <i>akselerasi</i> dan frekuensi pada pelat dan balok.....	20
7. Denah Lantai 2 Gedung E Fakultas Teknik.....	21
8. Lokasi Penelitian.....	22
9. Diagram Alir Penelitian.....	24
10. Grafik <i>hammer test</i>	26
11. Kolom pengujian <i>hammer test</i>	26
12. Balok pengujian <i>hammer test</i>	28
13. Kolom pengujian <i>Ultrasonic pulse velocity</i>	31
14. Grafik <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>	32
15. Balok pengujian <i>Ultrasonic pulse velocity</i>	34
16. <i>Acceleration</i> pada <i>Natural frequency</i> pengujian ke satu.....	35
17. <i>Acceleration</i> pada <i>Natural Frequency</i> pengujian kedua.....	35

18. Hasil Eksperimental pada <i>natural frequency</i> ke satu	36
19. Hasil Eksperimental pada <i>natural frequency</i> ke dua.....	36
20. <i>Acceleration</i> pada <i>walking</i> ke satu.....	37
21. <i>Acceleration</i> pada <i>walking</i> ke dua.....	37
22. Hasil eksperimental pada <i>walk</i> ke 1 searah sumbu y.....	38
23. Hasil eksperimental pada <i>walk</i> ke 2 searah sumbu y.....	38
24. Pemodelan pelat lantai 2 dengan SAP2000.....	40
25. <i>Rectangular Section</i> dan <i>Reinforcement Data</i> pada kolom.....	41
26. Dimensi penampang balok induk dan balok anak.....	42
27. <i>Deformed Shape</i> (MODE 1).....	43
28. <i>Acceleration</i> pada <i>Joint 49</i>	44
29. Frekuensi Beban Berjalan di <i>Joint 90</i>	44

BAB I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Struktur gedung bertingkat maupun rumah tinggal memiliki komponen yang berfungsi untuk menghubungkan kolom bangunan dan menahan beban lantai yang berada di atasnya, struktur tersebut disebut struktur balok. Dalam perencanaannya struktur balok dapat memakai banyak material, antara lain adalah beton bertulang, baja atau kombinasi antara baja dan beton (balok komposit). Dalam mendesain dimensi ramping pada balok yang berbentang panjang dengan mutu tinggi meskipun dipilih dimensi yang cukup kuat terhadap beban gempa dan beban statik tetapi tanpa disadari dapat menurunkan frekuensi alami lantai gedung dapat menjadi berbahaya dikarenakan frekuensinya berada dekat atau berimpit dengan beban hidup dinamik yang bekerja. Sehingga, problema getaran berlebihan pada lantai gedung berbentang panjang akibat beban hidup mulai mendapatkan perhatian dari peneliti dan para ahli struktur di negara maju untuk mengatasinya.

Gedung E Fakultas Teknik salah satu contoh struktur gedung bertingkat yang didirikan lebih dari 20 tahun lalu masih berdiri kokoh hingga saat ini. Lantai gedung perkuliahan ini menahan gaya-gaya dinamis yang berasal dari aktivitas manusia di gedung ketika mereka berjalan, melompat atau menari.

Eksitasi merupakan hasil dari getaran pada sistem pelat lantai gedung yang timbul dari kegiatan manusia bersifat ritmik seperti gerakan berlari, menari dan aerobik. Getaran yang berlebihan pada sistem pelat lantai gedung bertingkat, umumnya tidak terkait dengan keamanan gedung, tapi terkait dengan ketidaknyamanan penghuninya. Faktor utama yang memberikan kontribusi terhadap masalah getaran ini diantaranya sebagai berikut:

- 1) Bahan bangunan yang digunakan merupakan mutu tinggi atau bahan komposit pada elemen-elemen struktur gedung seperti balok yang memungkinkan elemen-elemen struktur tersebut dirancang lebih kecil atau lebih tipis,
- 2) Penurunan frekuensi alami lantai diakibatkan bentang lantai yang terlalu panjang, ditambah dengan semakin meningkatnya jumlah kegiatan manusia yang berirama seperti aerobik,
- 3) Berkurangnya damping komponen sistem pelat lantai karena penggunaan partisi dan barang-barang furnitur yang lebih sedikit dan faktor lainnya (Setareh, 2006).

Frekuensi getar (f_n) kurang dari 8 Hz dapat menimbulkan ketidaknyamanan yang terjadi akibat getaran pada sistem pelat lantai. Untuk mengurangi ketidaknyamanan tersebut frekuensi (f_n) sistem pelat harus ditingkatkan hingga mendekati 8 Hz.

Dalam peraturan yang digunakan dalam mendesain gedung ini sudah banyak mengalami perubahan. Hal ini menimbulkan kekhawatiran terhadap kapasitas

kekuatan struktur gedung. Oleh karena itu perlu adanya pengecekan terhadap kekuatan struktur dengan menggunakan peraturan ISO 2631-2 : 2003.

Pengecekan ini digunakan untuk menganalisis getaran yang diakibatkan beban dinamis dan getaran alamiah (*natural frequency*).

B. Tujuan Penelitian

Penelitian bertujuan untuk:

- a. Mengetahui tingkat kenyamanan dan keamanan struktur pelat dan balok.
- b. Mengatasi dan memberikan solusi pada permasalahan pelat dan balok yang diakibatkan oleh getaran manusia berjalan maupun melompat di gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung.

C. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan akan memberikan manfaat sebagai berikut:

- a. Mengembangkan pengetahuan tentang perilaku pelat dan balok akibat getaran.
- b. Menjadi pertimbangan bagi perencanaan bangunan gedung beton bertulang.

D. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dilakukan pengecekan terhadap pelat dan balok beton bertulang menggunakan data getaran yakni *walking vibration*. Pengambilan data kekuatan beton dilakukan dengan cara tidak merusak konstruksi dengan menggunakan alat *hammer test* dan UPV, sedangkan pengujian getaran

pada pelat beton menggunakan *accelerometer*. Oleh karena itu, penelitian ini dibatasi oleh masalah sebagai berikut:

1. Bagian struktur yang diamati pelat dan balok di lantai 2 Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Pengujian meliputi kekuatan beton dengan *hammer test* dan UPV.
3. Parameter kinerja pelat dan balok diamati berupa getaran dengan alat *accelerometer*.
4. Analisis getaran menggunakan *software SAP 2000* yang hasilnya mengacu pada ISO 2631-2 : 2003 dan *Steel Design Guide 11th Series “Floor Vibration due to Human Activity*.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab II ini membahas beberapa teori yang berkaitan dengan getaran pada sebuah bangunan gedung dengan rangka beton bertulang untuk memperhitungkan tingkat kenyamanan akibat beban dinamis yang menyebabkan getaran pada pelat dan balok.

A. Struktur Beton Bertulang

Sistem struktur yang dibangun dengan beton bertulang, seperti bangunan gedung dan lainnya dirancang dari prinsip dasar desain dan penelitian elemen beton bertulang yang menerima gaya aksial, momen lentur, gaya geser, momen puntir, atau kombinasi dari jenis gaya-gaya dalam tersebut. Prinsip dasar desain ini berlaku umum bagi setiap tipe sistem struktur selama diketahui variasi gaya aksial, momen lentur, gaya geser dan unsur gaya dalam lainnya, serta bentang dan dimensi setiap elemen. Pada beton bertulang, unsur beton mempunyai kekuatan tekan yang besar, tetapi tidak mampu menerima tegangan tarik, sehingga tulangan baja yang ditanam dalam beton menjadi unsur kekuatan yang memikul tegangan tarik.

Suatu bangunan gedung beton bertulang yang berlantai banyak sangat rawan terhadap keruntuhan jika tidak direncanakan dengan baik. Oleh karena itu, diperlukan suatu perencanaan struktur yang tepat dan teliti agar dapat

memenuhi kriteria kekuatan (*strength*), kenyamanan (*serviceability*), keselamatan (*safety*), dan umur rencana bangunan (*durability*). Beban-beban yang bekerja pada struktur seperti beban mati (*dead load*), beban hidup (*live load*), beban gempa (*earthquake*), dan beban angin (*wind load*) menjadi bahan perhitungan awal dalam perencanaan struktur untuk mendapatkan besar dan arah gaya-gaya yang bekerja pada setiap komponen struktur, kemudian dapat dilakukan analisis struktur untuk mengetahui besarnya kapasitas penampang dan tulangan yang dibutuhkan oleh masing-masing struktur (Gideon dan Takim, 1993).

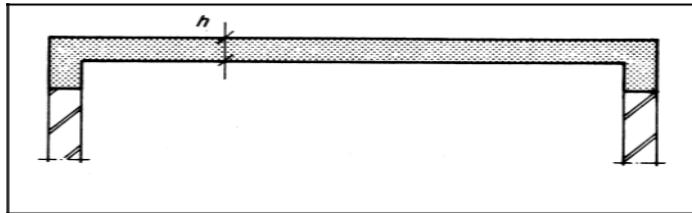
B. Pelat

Pelat beton (*concrete slabs*) merupakan elemen struktural yang menerima beban hidup dan beban mati pada lantai yang selanjutnya akan disalurkan ke balok dan kolom sampai ke struktur bawah. Pelat beton mempunyai peranan yang penting pada bangunan gedung bertingkat, baik sebagai pelat lantai dan pelat bordes ataupun pelat pada dak atap. Pelat diklasifikasikan berdasarkan cara pelat tersebut didukung. Dengan sistem pendukung tersebut, pelat akan melendut dalam satu arah atau dua arah.

1) Pelat satu arah (*one way slab*)

Pelat satu arah yaitu suatu lantai beton yang sistem pendukungnya (berupa balok) berada di sisi kiri dan kanan pelat. Pelat persegi yang mempunyai balok pendukung pada keempat sisinya dengan perbandingan antar sisi panjang pelat atau bentang panjang (l_y) dan sisi lebar pelat atau bentang pendek (l_x) $> 2,0$. Sistem pelat satu arah bisa

terjadi pada pelat tunggal maupun pelat menerus, asalkan persyaratan perbandingan panjang bentang kedua sisi pelat terpenuhi.



Sumber : Tata Cara Perhitungan Bangunan Gedung SNI 2847 2013

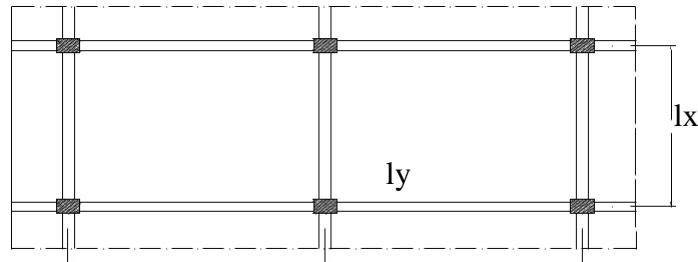
Gambar 1. Pelat satu arah.

2) Pelat dua arah (*two way slab*)

Sistem pelat lantai dua arah dapat juga terjadi pada pelat bentang tunggal maupun bentang menerus asal persyaratannya terpenuhi.

Perbandingan antar sisi panjang pelat atau bentang panjang (ly) dan sisi lebar pelat atau bentang pendek (lx) $< 2,0$. Beban pelat lantai pada jenis pelat ini disalurkan ke empat sisi pelat atau ke empat balok pendukung, akibatnya tulangan utama pelat diperlukan pada kedua arah sisi pelat.

Permukaan lendutan pelat mempunyai kelengkungan ganda.



Gambar 2. Pelat dua arah.

Pelat lantai didukung oleh balok-balok yang bertumpu pada kolom-kolom bangunan. Ketebalan pelat lantai ditentukan oleh :

1. Besar lendutan yang diinginkan.
2. Lebar bentangan atau jarak antara balok-balok pendukung.
3. Bahan material konstruksi dan pelat lantai.

Tabel 1. Tebal Minimum Pelat Tanpa Balok Interior

Tegangan leleh f_y mpa	Tanpa pembebahan			Dengan pembebahan			Panel interior	
	Panel eksterior		Panel interior	Panel eksterior		Panel interior		
	Tanpa balok pinggir	Dengan balok pinggir		Tanpa balok pinggir	Dengan balok pinggir			
280	ln/33	ln/36	ln/36	ln/36	ln/40	ln/40		
420	ln/30	ln/33	ln/33	ln/33	ln/36	ln/36		
520	ln/28	ln/31	ln/31	ln/33	ln/34	ln/34		

Sumber : Tata Cara Perhitungan Bangunan Gedung SNI 2847 2013

C. Balok Beton Bertulang

Balok beton adalah bagian dari struktur yang berfungsi sebagai penyalur momen menuju struktur kolom. Balok dikenal sebagai elemen lentur, yaitu elemen struktur yang dominan memikul gaya dalam berupa momen lentur dan gaya geser. Beton yang dibebani secara tetap dalam jangka waktu yang lama mengakibatkan beton memiliki sifat rangka. Oleh karena itu pada balok beton dikenal istilah *shortterm (immediate) deflection* dan *long-term deflection* yang membuat lendutan. Lendutan adalah fungsi dari kekakuan yaitu perkalian antara modulus elastisitas beton (E_c) dengan inersia penampang (I). Lendutan itu harus dibatasi, karena berkaitan dengan kenyamanan dan seni dalam arsitektur.

Satu hal yang penting dari struktur beton bertulang adalah masalah lendutan yang terjadi akibat beban yang bekerja. Struktur beton bertulang yang mengalami lentur harus direncanakan agar mempunyai kekakuan yang cukup untuk membatasi lendutan yang mungkin memperlemah kekuatan maupun kemampuan layan struktur pada beban kerja. Berkaitan dengan hal tersebut, bila bentang panjang maka lendutan akan besar. Untuk memperkecil lendutan biasanya dengan memperbesar kekakuan penampang (EI).

D. Beban Dinamis

Dalam merancang suatu struktur bangunan harus memenuhi beberapa syarat agar tercipta struktur yang kokoh, aman serta memiliki durabilitas yang direncanakan. Salah satu syarat yang harus terpenuhi salah satunya adalah dalam hal pembebanan yang telah diatur dalam Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung yang terbit tahun 1987. Salah satu beban yang diperhitungkan dalam suatu perancangan yakni beban dinamis. Beban dinamis merupakan beban yang berubah-ubah menurut waktu *time varying* sehingga beban dinamis merupakan fungsi dari waktu. Beban dinamik adalah berupa getaran-getaran yang dihasilkan oleh sumber getaran. Getaran-getaran tersebut dapat berupa getaran yang diakibatkan oleh mesin yang beroperasi, kereta api yang melintas di atas rel, aktivitas manusia seperti berjalan dan lain-lain.

E. Getaran

Getaran adalah gerakan bolak balik (*reciprocating*), memantul ke atas dan kebawah atau ke belakang dan kedepan. Gerakan tersebut terjadi secara teratur dari benda atau media dengan arah bolak balik dari kedudukannya. Hal tersebut dapat berpengaruh terhadap semua atau sebagian tubuh (ILO, 2013). Dalam satu getaran memiliki periode dan frekuensi. Periode adalah waktu yang ditempuh untuk melakukan suatu peristiwa. Dalam getaran, periode adalah waktu yang diperlukan untuk menempuh satu getaran. Satuan yang sering digunakan untuk periode adalah detik atau sekon (s). Simbol yang digunakan untuk melambangkan periode adalah T (huruf besar). Sedangkan, frekuensi sendiri memiliki arti yakni besaran ukuran jumlah putaran ulang suatu peristiwa dalam waktu tertentu. Dalam getaran, frekuensi adalah jumlah getaran yang melewati titik tertentu dalam satu detik. Satuan internasional yang dipakai untuk frekuensi adalah Hertz (Hz). Simbol yang digunakan untuk melambangkan frekuensi adalah f (huruf kecil).

1. *Natural Frequency*

Setiap struktur, secara matematis mempunyai frekuensi alami dan bentuk ragam yang tidak terbatas. Jika sebuah struktur bergetar pada suatu frekuensi yang sesuai dengan frekuensi alami, maka struktur tersebut akan memberikan respon berupa amplitudo yang terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu, membutuhkan energi yang sangat sedikit, sampai pada suatu waktu struktur itu menjadi kelebihan tegangan dan runtuhan. Untuk

menganalisis integritas struktur secara keseluruhan, frekuensi alami harus dihitung agar dapat dibandingkan dengan beban tergantung waktu yang bekerja pada struktur dimana frekuensinya berbeda dengan frekuensi alaminya. Sehingga struktur tersebut tidak akan mengalami lendutan yang berlebihan atau tegangan yang terlalu besar, dan dapat menghindari terjadinya resonansi dimana frekuensi yang disebabkan oleh beban yang tergantung waktu sama dengan frekuensi alami. Semua struktur memiliki besaran jumlah frekuensi alami. Frekuensi alami balok dapat diperkirakan menggunakan rumus:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

dimana:

f_n : frekuensi alami dalam Hertz (siklus/detik)

k : kekakuan (N/m)

m : massa (kg)

Setiap elemen struktur dalam sebuah sistem memiliki frekuensi sendiri yang dikenal frekuensi alamiah, dimana frekuensi ini dipengaruhi oleh kekakuan dan massa dari elemen tersebut. Penjelasan mengenai frekuensi dan model getaran alamiah sebagai berikut:

$$[k - \omega_n^2 m] \Phi_n = 0$$

Dimana:

m = massa struktur (ton)

K = kekakuan struktur (kN/m)

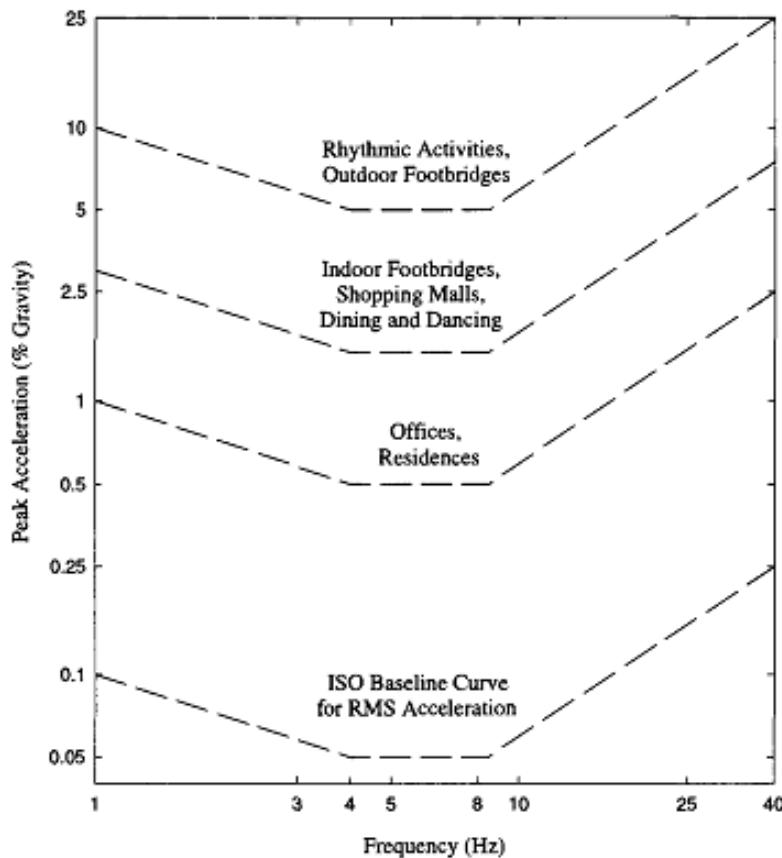
ω_n^2 = frekuensi alamiah struktur (rad/s)

Φ_n = pola getar alamiah

2. *Walking Vibration*

Manusia mampu menghasilkan kekuatan yang jauh lebih besar daripada berat badannya sendiri melalui aktivitas energik seperti berjalan maupun melompat. Salah satunya seperti disebutkan, beban yang dihasilkan oleh manusia sulit untuk diprediksi secara terperinci, amplitudo dan frekuensi akan bervariasi dalam berbagai jenis induksi. Untuk mencapai kenyamanan penghuni gedung dan kondisi bangunan yang aman, perlu dicari respons struktur untuk berbagai jenis pembebanan dinamis yang dapat diterapkan ke lantai

Frekuensi dan amplitudo yang diakibatkan oleh kegiatan manusia seperti berjalan, menari dan melompat menimbulkan gaya-gaya pada lantai. Gaya-gaya ini yang akan menimbulkan getaran pada sistem lantai karena antara struktur gedung dengan gaya gerakan manusia tidak dapat diisolasi (Hanagan and Murray, 1997). Getaran yang ditimbulkan pejalan kaki dapat menginduksi beban berirama dinamis impulsif pada arah vertikal dan horisontal yang didominasi oleh tingkat mondar-mandir. Tingkat mondar-mandir untuk berjalan adalah antara 1,6 dan 2,4 langkah per detik, yaitu 1,6-2,4 Hz (berjalan lambat sampai dengan cepat) sementara untuk kecepatan langkah *jogging* adalah sekitar 3 Hz (Collette, 2004).



Gambar 3. Rekomendasi ketinggian akselerasi kenyamanan manusia akibat getaran (*Steel Design Guide Series 11*, ISO 2631-2 : 2003).

F. Penelitian Terdahulu

1. Penelitian pada Struktur Beton Bertulang

Pada penilitian terdahulu yang dilakukan oleh Bachroni tahun 2015 tentang penanggulangan getaran pada pelat lantai beton bertulang membahas tentang getaran lantai merupakan fenomena yang dipengaruhi oleh beberapa parameter, termasuk evaluasi subjektif. Studi telah menunjukkan bahwa manusia memiliki tingkat sensitivitas yang berbeda terhadap getaran lantai, dan perbedaan ini diperburuk oleh keadaan dalam

ruangan. Misalnya, seseorang yang duduk di sebuah ruangan memiliki toleransi lebih sedikit terhadap getaran lantai daripada orang yang sama berjalan di sekitar ruangan.

Dalam penelitian tersebut Pengkajian dilakukan dengan metode analisis modal menggunakan program komputer SAP 2000.11.1 (Habibulah,1995). Metoda ini diterapkan sebagai studi kasus pada bangunan bertingkat yang berfungsi sebagai tempat ibadah di wilayah Timur Indonesia. Hasil penelitian tersebut mendapatkan kesimpulan penghitungan analisis modal, frekuensi sistem lantai asli (sebelum ditambah rangka baja) adalah 3,6 Hz. Nilai frekuensi alami ini terlalu rendah dan menyebabkan pelat lantai bergetar saat tereksitasi gerakan yang bersifat ritmik. Penanggulangan getaran menggunakan rangka batang baja hollow dengan dimensi penampang batang baja hollow 10 x 15 cm dan tebal 0,4 mm ternyata cukup efektif dalam mengubah frekuensi getar sistem lantai dari semula 3,6 Hz menjadi 8,62 Hz. Dengan frekuensi alami sebesar ini, masalah getaran yang berlebihan pada sistem lantai pada dasarnya telah dapat tertanggulangi, karena gerakan ritmik pada sistem pelat lantai beton bertulang hanya akan memberikan eksitasi pada pelat lantai sebesar 7 Hz.

2. Penelitian pada Struktur Komposit

Penelitian yang dilakukan oleh Prasetya (2011) mempertimbangkan beban hidup akibat aktivitas manusia pada perencanaan struktur jembatan penyebrangan. Manusia sebagai beban hidup selalu bergerak, dan pada aktivitas sekumpulan manusia berupa berjalan, menari, melompat maupun

berlari diatas pelat lantai akan mengakibatkan terjadinya vibrasi pada struktur (Ellis, 2004; Brownjohn, 2007).

Pada penelitian ini analisis menggunakan bantuan *software* elemen hingga yang diambil dari frekuensi alami yang menyebabkan getaran pada jembatan tersebut dan menggunakan mode shape dimana pada umumnya sebuah struktur jembatan bisa memiliki 3 macam model getaran inti. Horizontal, torsi, dan vertikal. Dengan model getaran lateral, struktur seluruh jembatan cenderung mengarah ke getaran horizontal. Ketika sebuah jembatan bergetar dibawah model getaran vertikal, keseluruhan struktur jembatan akan bergetar pada bidang vertikal, dan dibawah model getaran torsional, pelat akan berputar. Hasil dari penelitian tersebut untuk bentuk getaran dari mode pertama, struktur JPO beton didominasi oleh bentuk getaran horizontal, sedangkan struktur JPO baja didominasi oleh bentuk getaran vertikal. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk struktur JPO beton sangat rentan terhadap beban horizontal dibandingkan dengan beban vertikal dan torsi. Sedangkan untuk struktur JPO baja sangat rentan terhadap beban vertikal dibandingkan dengan beban horizontal dan torsi. Dan menggunakan data frekuensi alami dengan metode elemen hingga yang telah dibahas sebelumnya, sebuah struktur memiliki bentuk model alami. Setiap bentuk model memiliki frekuensi tertentu. Begitu juga dengan struktur JPO beton dan JPO baja. Untuk mode pertama, JPO beton memiliki frekuensi sebesar 2.75 Hz, sedangkan untuk JPO baja memiliki frekuensi sebesar 7.675 Hz.

BAB III. METODE PENELITIAN

Dalam BAB III ini membahas metode , lokasi, alat dan teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini. Dua metode yang akan dipergunakan dalam penelitian ini yaitu metode eksperimental dan numerik dengan menggunakan *software SAP 2000.*

A. Metode Eksperimental

Metode ini berupa kegiatan survey lapangan bertujuan untuk memperoleh kekuatan beton pada struktur yang diuji, dan mengetahui secara visual kerusakan-kerusakan yang terjadi di lapangan tanpa merusak konstruksi yang ada. Kegiatan ini terbagi menjadi 2 yaitu:

- a) Uji *Non-Destructive* (tanpa merusak)
- b) Pengamatan visual dan koleksi data

Uji *Non-Destructive* dilakukan dengan menggunakan alat-alat bantu tertentu untuk mendapatkan *property* dari material seperti kekuatan beton dari struktur balok dan pelat. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat bantu seperti *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV), dan *Hammer Test*. Serta pengujian getaran dan percepatan yang diakibatkan beban manusia dengan *Accelerometer.*

1. *Hammer Test*

Hammer test adalah pengujian yang bersifat tidak merusak untuk menghasilkan mutu permukaan beton. Metode penggunaan alat ini yaitu dengan memberikan suatu tumbukan pada permukaan beton yang di uji dengan suatu massa dengan memberikan energi tertentu. Setelah suatu massa tersebut ditumbukkan akan memberikan pantulan massa energi yang membuat indikator nilai pukulan. Nilai indikator pantulan pukulan inilah yang selanjutkan akan dikonversikan menjadi nilai kuat tekan.

Hammer test yang umumnya digunakan adalah *Hammer jenis Rebound Hammer*. Berikut metode pelaksanaan hammer test yang dilakukan dalam penelitian ini:

1. Sebelum melakukan pengujian, pastikan alat hammer test sudah terkalibrasi agar data yang diperoleh lebih akurat.
2. Menentukan titik pengujian yang ingin di tinjau dan bersihkan serta haluskan permukaan bentonnya.
3. Setelah itu tentukan sudut kemiringan dalam pengambilan sampelnya, apakah 0° (tegak lurus *horizontal*), -90° (tegak lurus kebawah), atau 90° (tegak lurus ke atas).
4. Pegang alat dengan kuat sehingga posisi hulu palu tegak lurus dengan permukaan beton yang diuji.
5. Tekan alat secara perlahan ke arah permukaan uji sampai palu pantul menumbuk ujung palu.
6. Setelah tumbukan tahan tekanan pada alat dan tekan tombol pada sisi alat untuk mengunci palu pada posisinya.

7. Baca dan catat hasil angka pantul yang terbaca.
8. Ulangi langkah diatas untuk mengambil data selanjutnya.



Gambar 4. *Hammer Test* untuk uji kuat tekan beton.

2. *Ultrasonic Pulse Velocity*

Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPVT) adalah cara untuk memperkirakan kekerasan beton yang didasarkan pada hubungan kecepatan gelombang UPV melalui media beton dengan kekuatan tekan beton (*International Atomic Energy Agency*, 2002). Saat gelombang merambat dalam medium berbeda, yaitu gel dan beton, akan terjadi pantulan gelombang pada batas beton dan gel yang merambat dalam bentuk gelombang transversal dan longitudinal. Alat uji UPV digunakan untuk memprediksi kekuatan, mendeteksi keberadaan kerusakan internal seperti retak, rongga-rongga, lapuk ataupun kerusakan-kerusakan lain dan mengukur modulus elastis. Berikut metode pelaksanaan UPV yang dilakukan dalam penelitian ini :

1. Sebelum melakukan pengujian, pastikan alat UPV sudah dikalibrasi agar data yang diperoleh lebih akurat.

2. Kemudian tentukan titik pengujinya, titik pengujian sama seperti pengujian *hammer test* namun jarak dan jumlah titiknya saja yang berbeda.
3. Setelah mengetahui titik mana saja yang akan diuji, lalu kita pastikan dahulu metode pengambilan data yang paling tepat, apakah *direct*, *semi direct*, atau *indirect*.
4. Kemudian ratakan titik yang ingin diuji dengan amplas, kemudian oleskan cairan gel saat *transmitter* dan *receiver* diletakkan di titik tersebut.
5. Letakan *transmitter* pada titik awal dan *receiver* pada titik berikutnya, kemudian catat waktu rambat yang didapat oleh UPV.
6. Setelah itu pindahkan *receiver* pada titik selanjutnya dan catat lagi waktu rambat yang didapat, lakukan hal ini berulang pada titik selanjutnya sesuai jumlah titik yang sudah ditentukan.



Gambar 5. *Ultrasonic Pulse Velocity* pengujian kuat beton eksisting.

Tabel 2. Pembacaan Kriteria Hasil Pengujian UPV

	<i>Pulse Velocity</i> (m/s)	<i>Concrete Condition</i>
<i>Concrete Quality</i>	>4500	<i>Excellent</i>
3500-4000	<i>Good</i>	
3000-3500	<i>Doubtfull</i>	
2000-3000	<i>Poor</i>	
<2000	<i>Very Poor</i>	

3. Accelerometer

Accelerometer digunakan untuk mendapatkan hasil berupa besarnya frekuensi dan akselerasi yang didapatkan dari beban berjalan (*walking vibration*) dimana alat diletakan di tengah pelat lantai yang dibebani orang berjalan.



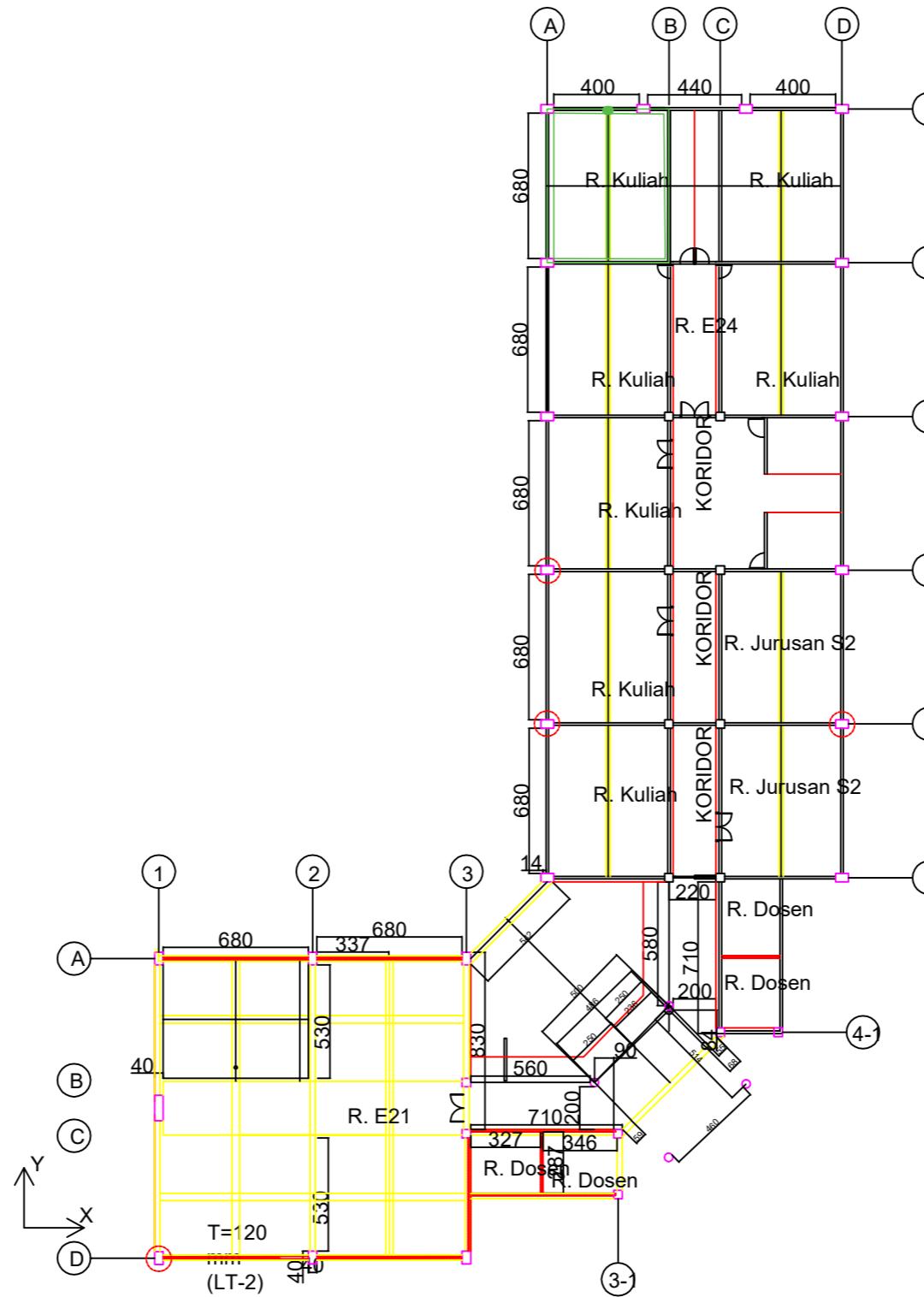
Gambar 6. *Accelerometer* untuk pengujian *akselerasi* dan frekuensi pada pelat dan balok.

B. Metode Numerik

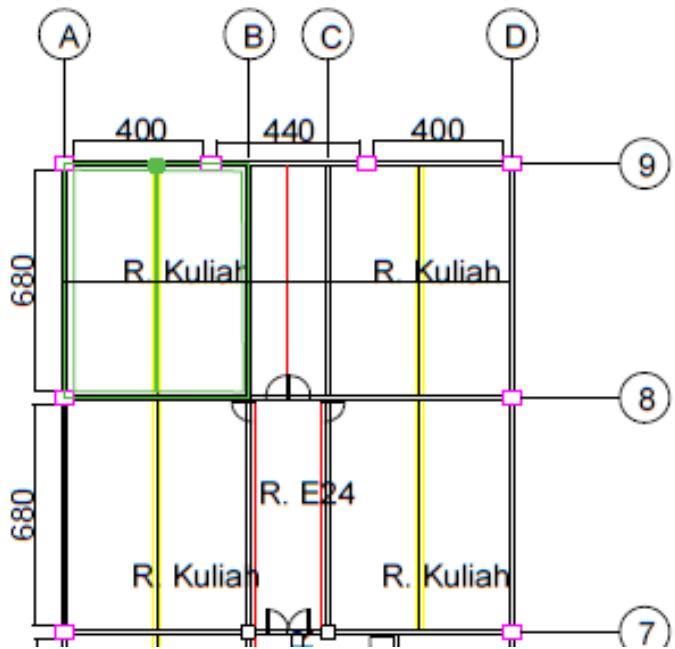
Analisis struktur bertujuan untuk menganalisis elemen-elemen struktur baik secara partial maupun secara keseluruhan dalam menentukan Kegiatan ini dilaksanakan dengan bantuan *software* yang tersedia sekarang seperti *software Structural Analysis Program (SAP) 2000*.

C. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di lantai 2 gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung yakni di ruangan E.24 seperti gambar 7 di bawah ini.



Gambar 7. Denah Lantai 2 Gedung E Fakultas Teknik.



Gambar 8. Lokasi Penelitian.

D. Data Penelitian

Data penelitian dapat digolongkan dalam dua kategori, yaitu: data primer dan data sekunder. Data yang didapat langsung dari pengamatan fakta yang ada di lapangan disebutkan data primer. Sedangkan data sekunder didapat melalui studi pustaka dan studi-studi lain yang mendukung. Dalam penelitian ini jenis data yang digunakan adalah data kuantitatif berkaitan dengan angka-angka yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan dengan pengujian kekuatan beton dan pengujian frekuensi akibat getaran dinamis (beban berjalan).

E. Teknik pengumpulan data

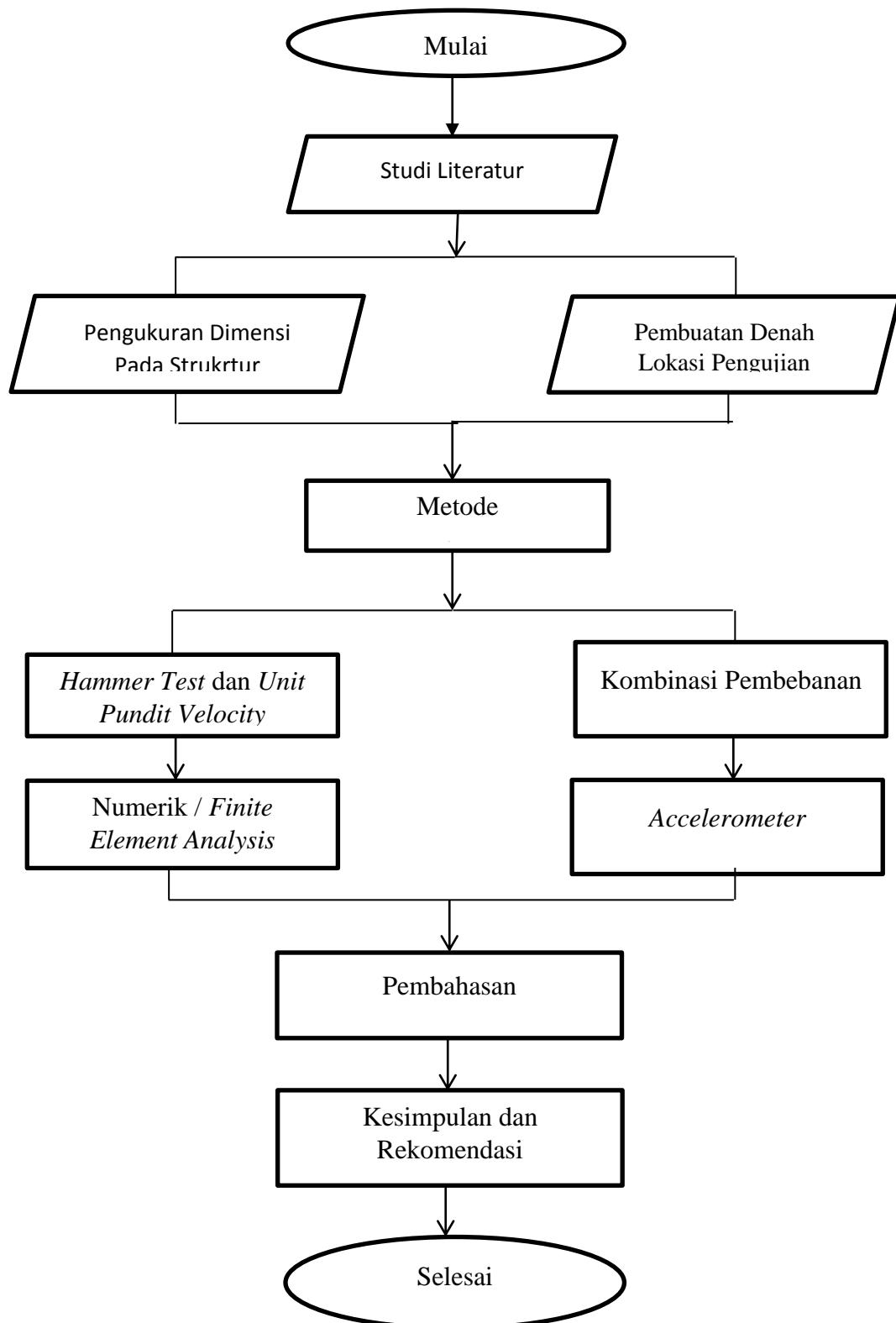
a. Observasi

Observasi adalah suatu cara penilaian dengan cara mengadakan pengamatan secara langsung dan juga sistematis. Untuk data-data yang telah diperoleh dalam observasi tersebut selanjutnya dicatat pada suatu catatan observasi. Dan kegiatan pencatatan itu sendiri juga merupakan bagian dari kegiatan pengamatan.

b. Pengukuran

Pengukuran getaran dinamis menggunakan *vibration meter VENNIE*. Pada pengujian di lapangan juga dilengkapi dengan data akusisi system yang dilengkapi dengan *accelerometer*. *Accelerometer* akan diletakan di posisi tengah balok dan pelat yang dibebani oleh orang berjalan dengan berat 63 kg dimana orang berjalan searah bentang Y dengan jarak perlangkah 75 cm di atas balok anak sehingga terdapat defleksi maksimum pada bagian tersebut. *Hammer test* dan UPV digunakan untuk menentukan kekuatan pada balok dan pelat beton bertulang .

F. Diagram Alir Peneleitian



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian.

BAB V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian material, getaran lantai dan analisis yang dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan pengujian di lapangan kuat tekan karakteristik beton yang telah di uji, hasil yang didapatkan kuat beton ($f'c$) bila dikonversikan ke mutu beton K menunjukkan mutu beton yakni antara K-350 dan K-400 yang menunjukkan bahwa mutu beton termasuk karakteristik beton mutu sedang.
2. Frekuensi pelat lantai dilapangan didapatkan hasil frekuensi getaran alami mencapai 20,26 – 23,25 Hz dan pengujian menggunakan beban berjalan frekuensi mencapai 12,94-14,98 Hz dimana hasil ini melebihi 4-8 hz pada gedung perkuliahan atau perkantoran.
3. Penelitian di lapangan akselerasi mencapai 1,5% g dimana ini jauh lebih besar untuk gedung perkuliahan atau perkantoran .
4. Pada pemodelan struktur menggunakan SAP ver'14 frekuensi sistem lantai asli sebelum ditambahkan kekakuan balok dan pelat adalah 8,05 Hz dan 8,13 Hz pada pengujian *walking*. Nilai frekuensi alami ini sudah cukup untuk mengatasi pelat lantai yang bergetar saat tereksitasi getaran yang bersifat ritmik.

5. Hasil akselerasi / vibrasi pada permodelan struktur menunjukan bahwa nilai akselerasi frekuensi alami dengan metode numerik mencapai 0,0163 sehingga nilai ini dibawah 0,5%g yang berarti struktur tersebut kaku .

B. Saran

Di sarankan menggunakan metode *discrete fourier transform* (DFT) dan *wavelet* untuk menghitung frekuensi alami dan nilai percepatan gravitasi pada hentakan kaki di pelat lantai bangunan bertingkat dan meninjau kembali getaran pada kolom karena penelitian ini hanya meninjau bagian pelat beton bertulang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahagloweb. 2017. *Getaran : Pengertian, Jenis, Besaran, Rumus, Satuan.* <https://www.ilmudasar.com/2017/10/Pengertian-Jenis-Besaran-Rumus-Satuan-Getaran-adalah.html>. 30 september 2019, 19.59.
- Alami, F. 2010. *Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*. Seminar dan pameran HAKI.
- Allen, D.E, Rainer, J.H and Pernica, G. 1985. Vibration Criteria for Assembly Occupancies. Canadian Journal of Civil Engineering. 12 (3). 617 – 623.
- American Institute Of Steel Construction. 2003. *Steel Design Guide Series 11 Floor Vibration Due to Human Activity*.
- Archbold, P and Brian Mullarney. 2017. *The Relationship between Pedestrian Loading and Dynamic Response of an FRP Composite Footbridge*.
- Bachroni, C.B. 2015. Penanggulangan Getaran Pada Pelat Lantai Beton Bertulang. Jurnal Pemukiman. Vol.10 No. 1 Mei 2015 : 1-10.
- Badan Standarisasi Nasional. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. SNI 2847: 2013.
- Berbagaireviews. 2018. Struktur Beton Bertulang, Pengertian, Klasifikasi, Sifat-sifat, Kekuatan, Reinforced Concrete. www.berbagaireviewers.com./2018/07/struktur-beton-bertulang-pengertian. 18 oktober 2019, 20.54.
- Bhara, F.K. 2014. *Analisis Respons Getaran Lantai Fleksibel Akibat Aktivitas Manusia*. Teknik. Teknik Sipil. Universitas Atmajaya. Yogyakarta
- Brownjohn, J.M.W., Pavic, A. 2007. Experiment Method for Estimating Modal Mass in Footbridges Using Human-Include Dynamic Excitation. Elsevier. Engineering Structures. 29(21): 2833-2843
- Collette, F. 2004. *Comfort an Vibrations on Floors due to Walking Loads*. CQWI Publications. The Scandinavian Vibration Society (SVIB).Stockholm.
- Dipohusodo, I. 1996. *Struktur Beton Bertulang : Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Ellis, B.R., and Ji, T. 2004. Load Generated by Jumping Crowds. Numerical Modelling. The Structural Engineering. 82(17): 35-40.

- Fyfe.2013.*Tyfo SEH-51A Composite*. San Diego.
- Gideon K, Takim A. 1993. *Desain Struktur Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa*. Erlangga. Jakarta.
- Habibullah, Asraf. 1995. *Analysis Structur Program*. SAP 2000.11.1.
- Hanagan L. and Murray T. 1997. Active Control Approach for Reducing Floor Vibrations. Journal of Structural Engineering. Nov pp1497-1505.
- International Atomic Energy Agency. 2002. *Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures*. IAEA 2002. Industrial Applications and Chemistry Section. Vienna.
- ILO. 2013. *Health and Safety in Work Place for Productivity*. Geneva: International Labour Office.
- ISO 2631-2, 2003. *Mechanical vibration and shock—Evaluation of human exposure to whole-body vibration—Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*
- Lawson, K.A. Danso, H.C. Odoi, C.A. Adjei, F.K. Quashie, I.I. Mumuni, dan I.S. Ibrahim. 2011. Non Destructive Evaluation of Concrete using Ultrasonic Pulse Velocity Research. Journal of Applied Sciences. Engineering and Technology Vol 3. No 6, h: 499-504, 2011.ISSN: 2040-7467. Maxwell Scientific Organization.
- Narimawati, Umi. 2008. *Metode Penelitian kualitatif dan kuantitatif*. Jakarta. Agung Media.
- Ridho, Faisal dan Heri. 2015. Perbandingan Mutu Beton Hasil Upvt Metode Indirect Terhadap Mutu Beton Hasil Hammer Test Dan Core Drill. Jurnal Konstruksia. Vol.6. No.2.
- Rimaza, Dwi Catra dan Daud Rachmat Wiyono. 2014. Pengaruh Getaran pada Struktur Bangunan Satu Tingkat Akibat Gerakan Manusia. Jurnal Teknik Sipil Vol.10 No.2
- Sabdono, P., DKK. 2013. Perbandingan Hasil Simulasi dan Hasil Uji Kekuatan Dinding dari Batako Tanpa Plester dan Tanpa Perekat (btptp) Tanpa Pengencangan untuk Beban Statis. Prosiding Seminar Nasional TEKNOIN 2013, Vol 2, ISBN 978-602-14272-0-0 pp. B68-B71
- Setareh, M. 2006. Pendulum Tune Mass Dampers for Floor Vibration Control. Journal Of Performance of Construction Facilities.
- SNI 03-6468-2000. Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi Dengan Semen Portland dengan Abuterbang
- SOP UPVT HESA 2014. *Ultrasonic Pulse Velocity Test*.

Suharjo, Ray Richard. 2016. Kekuatan Lentur Balok Dengan Perkuatan GFRP Akibat Rendaman Air Laut Selama 2 Tahun (Tugas Akhir). Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Gowa.

Turnip, Stephanus Martua. 2019. Evaluasi Dan Perkuatan Struktur Pelat, Dan Dinding Geser Dengan Glass Fiber Reinforced Polymer (Gfrp). Fakultas Teknik Universitas Lampung. Lampung

Udianto, DKK. 2013. Purwarupa Sistem Pemantau Getaran Jembatan Menggunakan Sensor Accelerometer. Yogyakarta. IJEIS. Vol.3. No.2.

Ugural, A.C. 1999 . *Stresses in Plates and Shells*. Singapore. The McGraw-Hill Companies, Inc.

Ujianto, M. 2006. Lendutan dan Kekakuan Balok Beton Bertulang dengan Lubang Segi Empat di Badan. Jurnal ECO Rekayasa Vol. 2 No. 2.

Universitas Lampung. 2019. *Pedoman Penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung*. Unila Offset : Bandar Lampung.

Prasetya, D.A. 2011 .Studi Kelakuan Dinamis Struktur Jembatan Penyeberangan Orang (JPO) Akibat Beban Manusia Yang Bergerak : JPO Baja Depan McDonald Basuki Rahmat dan JPO Beton Depan City Bank Basuki Rahmat. Teknik Sipil Institut Teknologi Semarang.

Judul Penelitian	: Studi Kinerja Pelat Dan Balok Beton Bertulang Di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran
Peneliti	: Dhea Yulia Resmonida
Tempat	: Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung

DOKUMENTASI PENELITIAN

LAMPIRAN



Lampiran A.1

Judul Penelitian	: Studi Kinerja Pelat Dan Balok Beton Bertulang Di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran
Peneliti	: Dhea Yulia Resmonida
Tempat	: Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung

PERALATAN



Gambar 1. Laser Distance Meteran.



Gambar 2. Meteran.

Lampiran A.1

Judul Penelitian	: Studi Kinerja Pelat Dan Balok Beton Bertulang Di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran
Peneliti	: Dhea Yulia Resmonida
Tempat	: Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung



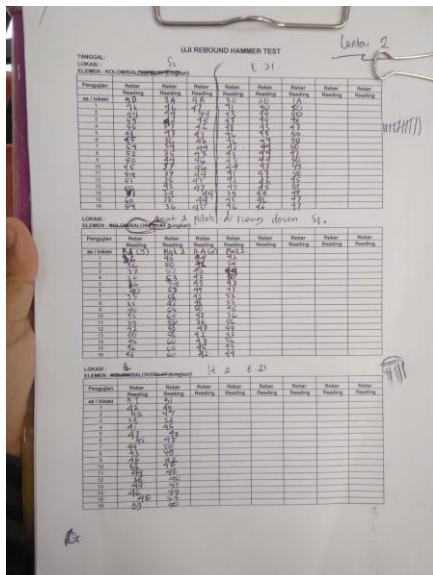
Gambar 3. Selotip.



Gambar 4. Kertas Titik Pengambilan *Hammer Test*.

Lampiran A.1

Judul Penelitian	: Studi Kinerja Pelat Dan Balok Beton Bertulang Di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran
Peneliti	: Dhea Yulia Resmonida
Tempat	: Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung



Gambar 5. Lembar Penelitian.



Gambar 6. Mal untuk UPV.

Lampiran A.1

Judul Penelitian	: Studi Kinerja Pelat Dan Balok Beton Bertulang Di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran
Peneliti	: Dhea Yulia Resmonida
Tempat	: Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung



Gambar 7. Alat Kalibrasi UPV.



Gambar 8.Gel.

Lampiran A.2

Judul Penelitian	: Studi Kinerja Pelat Dan Balok Beton Bertulang Di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran
Peneliti	: Dhea Yulia Resmonida
Tempat	: Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung

PENGUJIAN



Gambar 10. Pengujian Balok dengan Hammer Test.



Gambar 12. Pengujian Hammer Test pada Kolom.

Lampiran A.2

Judul Penelitian	: Studi Kinerja Pelat Dan Balok Beton Bertulang Di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran
Peneliti	: Dhea Yulia Resmonida
Tempat	: Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung



Gambar 13. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* pada Balok.



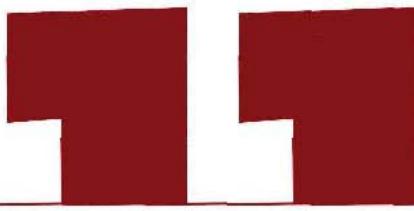
Gambar 14. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* pada Kolom.

Judul Penelitian	: Studi Kinerja Pelat Dan Balok Beton Bertulang Di Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung Akibat Getaran
Peneliti	: Dhea Yulia Resmonida
Tempat	: Gedung E Fakultas Teknik Universitas Lampung

FLOOR VIBRATION

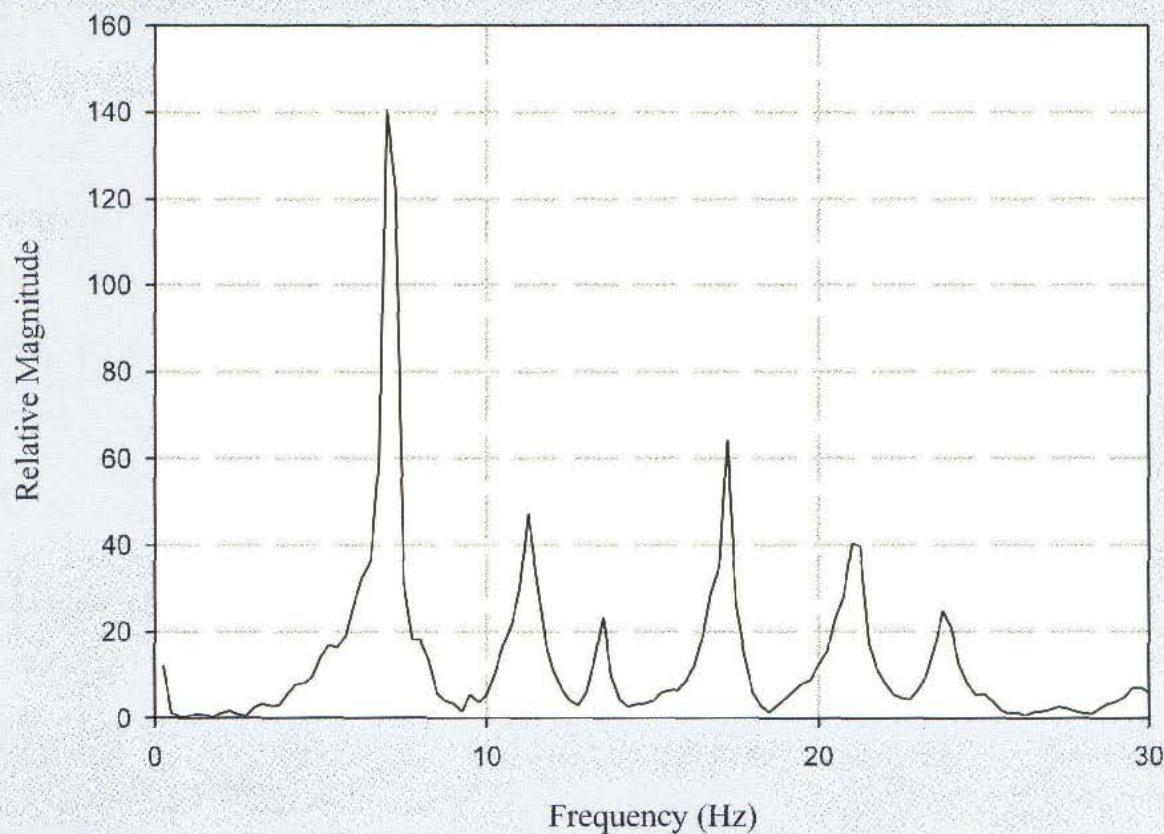
LAMPIRAN B





Steel Design Guide Series

Floor Vibrations Due to Human Activity





Steel Design Guide Series

Floor Vibrations Due to Human Activity

Thomas M. Murray, PhD, P.E.

Montague-Betts Professor of Structural Steel Design
The Charles E. Via, Jr. Department of Civil Engineering
Virginia Polytechnic Institute and State University
Blacksburg, Virginia, USA

David E. Allen, PhD

Senior Research Officer
Institute for Research in Construction
National Research Council Canada
Ottawa, Ontario, Canada

Eric E. Ungar, ScD, P.E.

Chief Engineering Scientist
Acentech Incorporated
Cambridge, Massachusetts, USA

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION
CANADIAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION

Copyright © 1997
by
American Institute of Steel Construction, Inc.

*All rights reserved. This book or any part thereof
must not be reproduced in any form without the
written permission of the publisher.*

The information presented in this publication has been prepared in accordance with recognized engineering principles and is for general information only. While it is believed to be accurate, this information should not be used or relied upon for any specific application without competent professional examination and verification of its accuracy, suitability, and applicability by a licensed professional engineer, designer, or architect. The publication of the material contained herein is not intended as a representation or warranty on the part of the American Institute of Steel Construction or of any other person named herein, that this information is suitable for any general or particular use or of freedom from infringement of any patent or patents. Anyone making use of this information assumes all liability arising from such use.

Caution must be exercised when relying upon other specifications and codes developed by other bodies and incorporated by reference herein since such material may be modified or amended from time to time subsequent to the printing of this edition. The Institute bears no responsibility for such material other than to refer to it and incorporate it by reference at the time of the initial publication of this edition.

Printed in the United States of America

Second Printing: October 2003

The co-sponsorship of this publication by the Canadian Institute
of Steel Construction is gratefully acknowledged.

Chapter 1

INTRODUCTION

1.1 Objectives of the Design Guide

The primary objective of this Design Guide is to provide basic principles and simple analytical tools to evaluate steel framed floor systems and footbridges for vibration serviceability due to human activities. Both human comfort and the need to control movement for sensitive equipment are considered. The secondary objective is to provide guidance on developing remedial measures for problem floors.

1.2 Road Map

This Design Guide is organized for the reader to move from basic principles of floor vibration and the associated terminology in Chapter 1, to serviceability criteria for evaluation and design in Chapter 2, to estimation of natural floor frequency (the most important floor vibration property) in Chapter 3, to applications of the criteria in Chapters 4, 5 and 6, and finally to possible remedial measures in Chapter 7. Chapter 4 covers walking-induced vibration, a topic of widespread importance in structural design practice. Chapter 5 concerns vibrations due to rhythmic activities such as aerobics and Chapter 6 provides guidance on the design of floor systems which support sensitive equipment, topics requiring increased specialization. Because many floor vibrations problems occur in practice, Chapter 7 provides guidance on their evaluation and the choice of remedial measures. The Appendix contains a short historical development of the various floor vibration criteria used in North America.

1.3 Background

For floor serviceability, stiffness and resonance are dominant considerations in the design of steel floor structures and footbridges. The first known stiffness criterion appeared nearly 170 years ago. Tredgold (1828) wrote that girders over long spans should be "made deep to avoid the inconvenience of not being able to move on the floor without shaking everything in the room". Traditionally, soldiers "break step" when marching across bridges to avoid large, potentially dangerous, resonant vibration.

A traditional stiffness criterion for steel floors limits the live load deflection of beams or girders supporting "plastered ceilings" to span/360. This limitation, along with restricting member span-to-depth ratios to 24 or less, have been widely applied to steel framed floor systems in an attempt to control vibrations, but with limited success.

Resonance has been ignored in the design of floors and footbridges until recently. Approximately 30 years ago, prob-

lems arose with vibrations induced by walking on steel-joist supported floors that satisfied traditional stiffness criteria. Since that time much has been learned about the loading function due to walking and the potential for resonance.

More recently, rhythmic activities, such as aerobics and high-impact dancing, have caused serious floor vibration problems due to resonance.

A number of analytical procedures have been developed which allow a structural designer to assess the floor structure for occupant comfort for a specific activity and for suitability for sensitive equipment. Generally, these analytical tools require the calculation of the first natural frequency of the floor system and the maximum amplitude of acceleration, velocity or displacement for a reference excitation. An estimate of damping in the floor is also required in some instances. A human comfort scale or sensitive equipment criterion is then used to determine whether the floor system meets serviceability requirements. Some of the analytical tools incorporate limits on acceleration into a single design formula whose parameters are estimated by the designer.

1.4 Basic Vibration Terminology

The purpose of this section is to introduce the reader to terminology and basic concepts used in this Design Guide.

Dynamic Loadings. *Dynamic loadings* can be classified as harmonic, periodic, transient, and impulsive as shown in Figure 1.1. *Harmonic or sinusoidal loads* are usually associated with rotating machinery. *Periodic loads* are caused by rhythmic human activities such as dancing and aerobics and by impactive machinery. *Transient loads* occur from the movement of people and include walking and running. Single jumps and heel-drop impacts are examples of *impulsive loads*.

Period and Frequency. *Period* is the time, usually in seconds, between successive peak excursions in repeating events. *Period* is associated with harmonic (or sinusoidal) and repetitive time functions as shown in Figure 1.1. *Frequency* is the reciprocal of period and is usually expressed in Hertz (cycles per second, Hz).

Steady State and Transient Motion. If a structural system is subjected to a continuous harmonic driving force (see Figure 1.1a), the resulting motion will have a constant frequency and constant maximum amplitude and is referred to as *steady state motion*. If a real structural system is subjected to a single impulse, damping in the system will cause the

motion to subside, as illustrated in Figure 1.2. This is one type of *transient motion*.

Natural Frequency and Free Vibration. *Natural frequency* is the frequency at which a body or structure will vibrate when displaced and then quickly released. This state of vibration is referred to as *free vibration*. All structures have a large number of natural frequencies; the lowest or "fundamental" natural frequency is of most concern.

Damping and Critical Damping. Damping refers to the loss of mechanical energy in a vibrating system. Damping is usually expressed as the percent of *critical damping* or as the ratio of actual damping (assumed to be viscous) to critical damping. Critical damping is the smallest amount of viscous damping for which a free vibrating system that is displaced from equilibrium and released comes to rest without oscillation. "Viscous" damping is associated with a retarding force that is proportional to velocity. For damping that is smaller than critical, the system oscillates freely as shown in Figure 1.2.

Until recently, damping in floor systems was generally determined from the decay of vibration following an impact (usually a heel-drop), using vibration signals from which vibration beyond 1.5 to 2 times the fundamental frequency has been removed by filtering. This technique resulted in damping ratios of 4 to 12 percent for typical office buildings. It has been found that this measurement overestimates the damping because it measures not only energy dissipation (the true damping) but also the transmission of vibrational energy to other structural components (usually referred to as geometric dispersion). To determine modal damping all modes of

vibration except one must be filtered from the record of vibration decay. Alternatively, the modal damping ratio can be determined from the Fourier spectrum of the response to impact. These techniques result in damping ratios of 3 to 5 percent for typical office buildings.

Resonance. If a frequency component of an exciting force is equal to a natural frequency of the structure, *resonance* will occur. At resonance, the amplitude of the motion tends to become large to very large, as shown in Figure 1.3.

Step Frequency. *Step frequency* is the frequency of application of a foot or feet to the floor, e.g. in walking, dancing or aerobics.

Harmonic. A *harmonic multiple* is an integer multiple of frequency of application of a repetitive force, e.g. multiple of step frequency for human activities, or multiple of rotational frequency of reciprocating machinery. (Note: Harmonics can also refer to natural frequencies, e.g. of strings or pipes.)

Mode Shape. When a floor structure vibrates freely in a particular mode, it moves up and down with a certain configuration or *mode shape*. Each natural frequency has a mode shape associated with it. Figure 1.4 shows typical mode shapes for a simple beam and for a slab/beam/girder floor system.

Modal Analysis. *Modal analysis* refers to a computational, analytical or experimental method for determining the natural frequencies and mode shapes of a structure, as well as the responses of individual modes to a given excitation. (The responses of the modes can then be superimposed to obtain a total system response.)

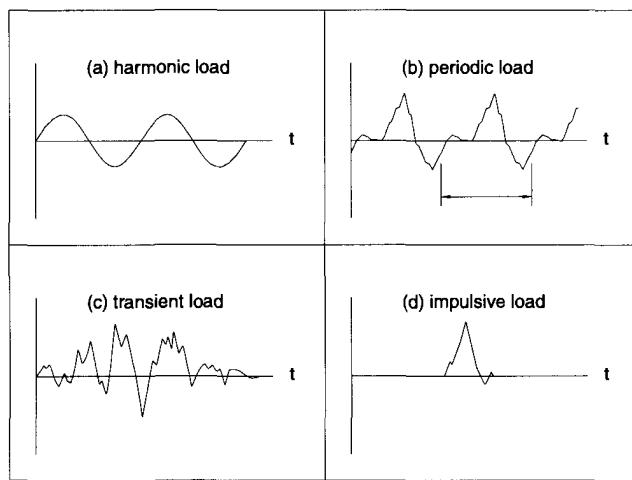


Fig. 1.1 Types of dynamic loading.

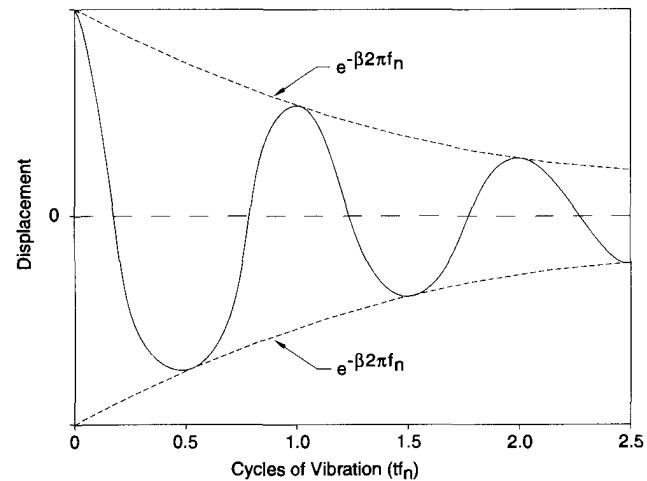


Fig. 1.2 Decaying vibration with viscous damping.

Spectrum. A *spectrum* shows the variation of relative amplitude with frequency of the vibration components that contribute to the load or motion. Figure 1.5 is an example of a frequency spectrum.

Fourier Transformation. The mathematical procedure to transform a time record into a complex frequency spectrum (Fourier spectrum) without loss of information is called a *Fourier Transformation*.

Acceleration Ratio. The acceleration of a system divided by the acceleration of gravity is referred to as the *acceleration ratio*. Usually the peak acceleration of the system is used.

Floor Panel. A rectangular plan portion of a floor encompassed by the span and an effective width is defined as a *floor panel*.

Bay. A rectangular plan portion of a floor defined by four column locations.

1.5 Floor Vibration Principles

Although human annoyance criteria for vibration have been known for many years, it has only recently become practical to apply such criteria to the design of floor structures. The reason for this is that the problem is complex—the loading is complex and the response complicated, involving a large number of modes of vibration. Experience and research have

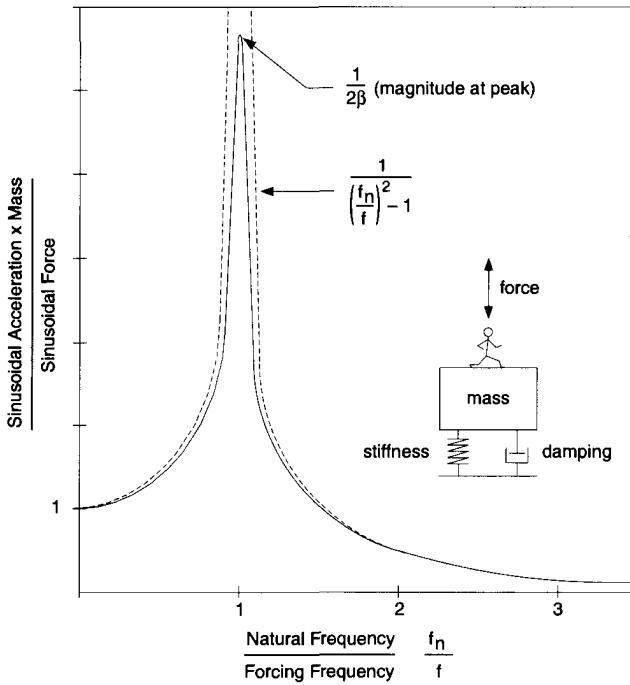


Fig. 1.3 Response to sinusoidal force.

shown, however, that the problem can be simplified sufficiently to provide practical design criteria.

Most floor vibration problems involve repeated forces caused by machinery or by human activities such as dancing, aerobics or walking, although walking is a little more complicated than the others because the forces change location with each step. In some cases, the applied force is sinusoidal or nearly so. In general, a repeated force can be represented by a combination of sinusoidal forces whose frequencies, f_i , are multiples or harmonics of the basic frequency of the force repetition, e.g. step frequency, f_{step} , for human activities. The time-dependent repeated force can be represented by the Fourier series

$$F = P [1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi i f_{step} t + \phi_i)] \quad (1.1)$$

where

P = person's weight

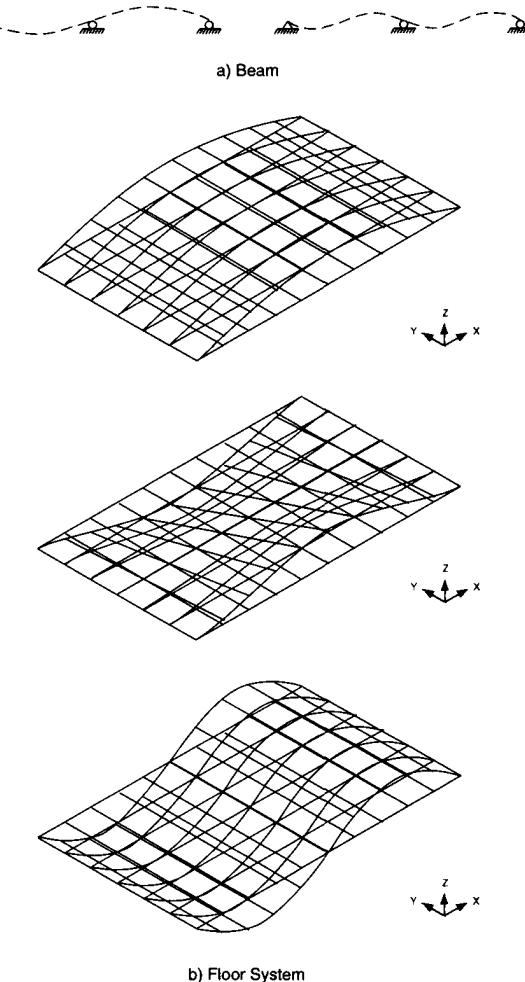


Fig. 1.4 Typical beam and floor system mode shapes.

- α_i = dynamic coefficient for the harmonic force
- i = harmonic multiple (1, 2, 3,...)
- f_{step} = step frequency of the activity
- t = time
- ϕ_i = phase angle for the harmonic

As a general rule, the magnitude of the dynamic coefficient decreases with increasing harmonic, for instance, the dynamic coefficients associated with the first four harmonics of walking are 0.5, 0.2, 0.1 and 0.05, respectively. In theory, if any frequency associated with the sinusoidal forces matches the natural frequency of a vibration mode, then resonance will occur, causing severe vibration amplification.

The effect of resonance is shown in Figure 1.3. For this figure, the floor structure is modeled as a simple mass connected to the ground by a spring and viscous damper. A person or machine exerts a vertical sinusoidal force on the mass. Because the natural frequency of almost all concrete slab-structural steel supported floors can be close to or can match a harmonic forcing frequency of human activities, resonance amplification is associated with most of the vibration problems that occur in buildings using structural steel.

Figure 1.3 shows sinusoidal response if there is only one mode of vibration. In fact, there may be many in a floor system. Each mode of vibration has its own displacement configuration or "mode shape" and associated natural frequency. A typical mode shape may be visualized by considering the floor as divided into an array of panels, with adjacent panels moving in opposite directions. Typical mode shapes for a bay are shown in Figure 1.4(b). The panels are large for low-frequency modes (panel length usually corresponding to

a floor span) and small for high frequency modes. In practice, the vibrational motion of building floors are localized to one or two panels, because of the constraining effect of multiple column/wall supports and non-structural components, such as partitions.

For vibration caused by machinery, any mode of vibration must be considered, high frequency, as well as, low frequency. For vibration due to human activities such as dancing or aerobics, a higher mode is more difficult to excite because people are spread out over a relatively large area and tend to force all panels in the same direction simultaneously, whereas adjacent panels must move in opposite directions for higher modal response. Walking generates a concentrated force and therefore may excite a higher mode. Higher modes, however, are generally excited only by relatively small harmonic walking force components as compared to those associated with the lowest modes of vibration. Thus, in practice it is usually only the lowest modes of vibration that are of concern for human activities.

The basic model of Figure 1.3 may be represented by:

$$\text{Sinusoidal Acceleration} = \left(\frac{\text{Force}}{\text{Mass}} \right) \times \text{Response Factor} \quad (1.2)$$

where the response factor depends strongly on the ratio of natural frequency to forcing frequency (f_n/f) and, for vibration at or close to resonance, on the damping ratio (β). It is these parameters that control the vibration serviceability design of most steel floor structures.

It is possible to control the acceleration at resonance by increasing damping or mass since acceleration = force divided by damping times mass (see Figure 1.3). The control is most effective where the sinusoidal forces are small, as they are for walking. Natural frequency also always plays a role, because sinusoidal forces generally decrease with increasing harmonic—the higher the natural frequency, the lower the force. The design criterion for walking vibration in Chapter 4 is based on these principles.

Where the dynamic forces are large, as they are for aerobics, resonant vibration is generally too great to be controlled practically by increasing damping or mass. In this case, the natural frequency of any vibration mode significantly affected by the dynamic force (i.e. a low frequency mode) must be kept away from the forcing frequency. This generally means that the fundamental natural frequency must be made greater than the forcing frequency of the highest harmonic force that can cause large resonant vibration. For aerobics or dancing, attention should be paid to the possibility of transmission of vibrations to sensitive occupancies in other parts of the floor and other parts of the building. This requires the consideration of vibration transfer through supports, such as columns, particularly to parts of the building which may be in resonance with the harmonic force. The design criterion for rhythmic activities in Chapter 5 takes this into account.

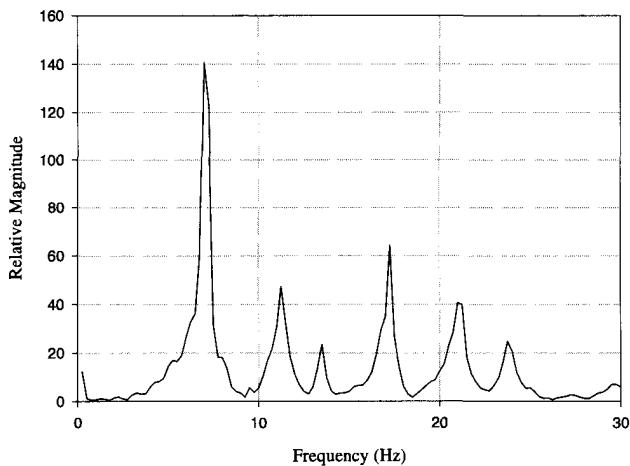


Fig. 1.5 Frequency spectrum.

Where the natural frequency of the floor exceeds 9-10 Hz or where the floors are light, as for example wood deck on light metal joists, resonance becomes less important for human induced vibration, and other criteria related to the response of the floor to footstep forces should be used. When floors are very light, response includes time variation of static

deflection due to a moving repeated load (see Figure 1.6), as well as decaying natural vibrations due to footstep impulses (see Figure 1.7). A point load stiffness criterion is appropriate for the static deflection component and a criterion based on footstep impulse vibration is appropriate for the footstep impulses.

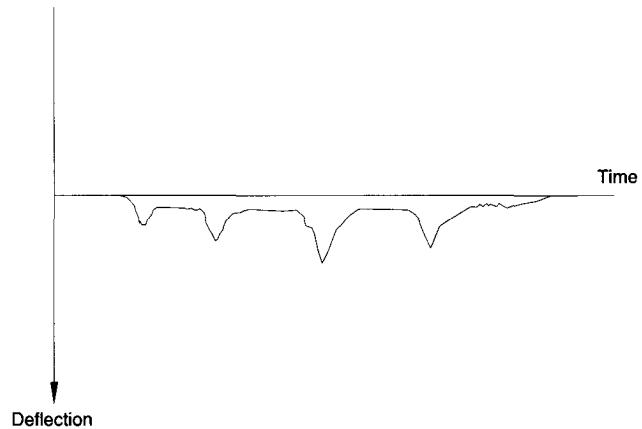


Fig. 1.6 Quasi-static deflection of a point on a floor due to a person walking across the floor.

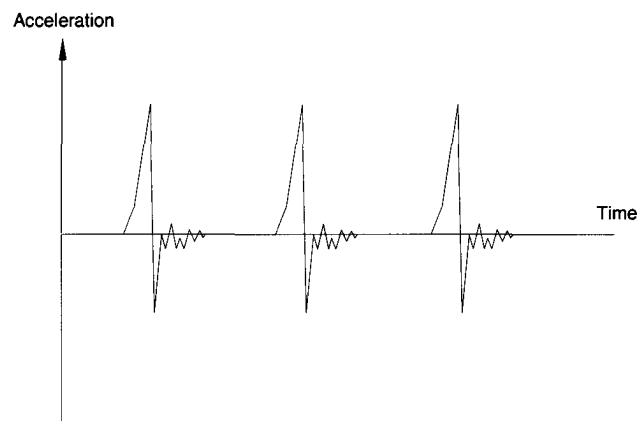


Fig. 1.7 Floor vibration due to footstep impulses during walking.

Chapter 2

ACCEPTANCE CRITERIA FOR HUMAN COMFORT

2.1 Human Response to Floor Motion

Human response to floor motion is a very complex phenomenon, involving the magnitude of the motion, the environment surrounding the sensor, and the human sensor. A continuous motion (steady-state) can be more annoying than motion caused by an infrequent impact (transient). The threshold of perception of floor motion in a busy workplace can be higher than in a quiet apartment. The reaction of a senior citizen living on the fiftieth floor can be considerably different from that of a young adult living on the second floor of an apartment complex, if both are subjected to the same motion.

The reaction of people who feel vibration depends very strongly on what they are doing. People in offices or residences do not like "distinctly perceptible" vibration (peak acceleration of about 0.5 percent of the acceleration of gravity, g), whereas people taking part in an activity will accept vibrations approximately 10 times greater (5 percent g or more). People dining beside a dance floor, lifting weights beside an aerobics gym, or standing in a shopping mall, will accept something in between (about 1.5 percent g). Sensitivity within each occupancy also varies with duration of vibration and remoteness of source. The above limits are for vibration frequencies between 4 Hz and 8 Hz. Outside this frequency range, people accept higher vibration accelerations as shown in Figure 2.1.

2.2 Recommended Criteria for Structural Design

Many criteria for human comfort have been proposed over the years. The Appendix includes a short historical development of criteria used in North America and Europe. Following are recommended design criteria for walking and rhythmic excitations. The recommended walking excitation criterion, methods for estimating the required floor properties, and design procedures were first proposed by Allen and Murray (1993). The criterion differs considerably from previous "heel-drop" based approaches. Although the proposed criterion for walking excitation is somewhat more complex than previous criteria, it has a wider range of applicability and results in more economical, but acceptable, floor systems.

2.2.1 Walking Excitation

As part of the effort to develop this Design Guide, a new criterion for vibrations caused by walking was developed with broader applicability than the criteria currently used in North America. The criterion is based on the dynamic response of steel beam- or joist-supported floor systems to

walking forces, and can be used to evaluate structural systems supporting offices, shopping malls, footbridges, and similar occupancies (Allen and Murray 1993). Its development is explained in the following paragraphs and its application is shown in Chapter 4.

The criterion was developed using the following:

- Acceleration limits as recommended by the International Standards Organization (International Standard ISO 2631-2, 1989), adjusted for intended occupancy. The ISO Standard suggests limits in terms of rms acceleration as a multiple of the baseline line curve shown in Figure 2.1. The multipliers for the proposed criterion, which is expressed in terms of peak acceleration, are 10 for offices, 30 for shopping malls and indoor footbridges, and 100 for outdoor footbridges. For design purposes, the limits can be assumed to range between 0.8 and 1.5 times the recommended values depending on

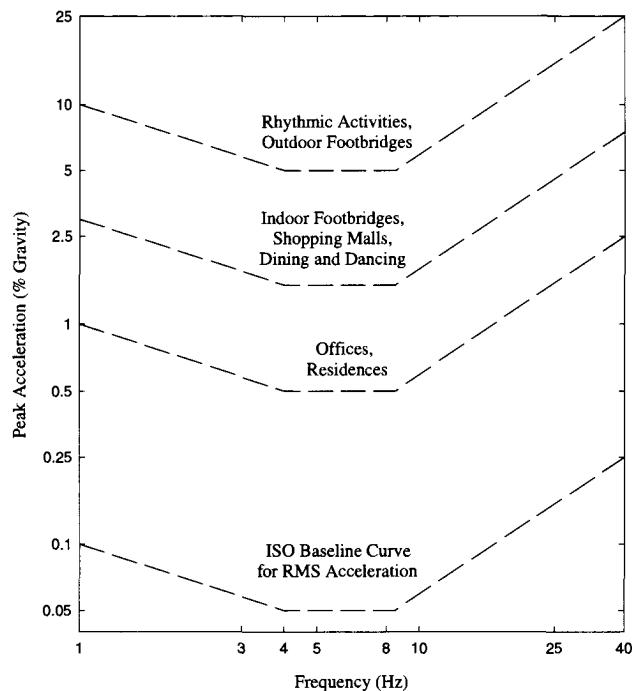


Fig. 2.1 Recommended peak acceleration for human comfort for vibrations due to human activities (Allen and Murray, 1993; ISO 2631-2: 1989).

the duration of vibration and the frequency of vibration events.

- A time dependent harmonic force component which matches the fundamental frequency of the floor:

$$F_i = P\alpha_i \cos(2\pi i f_{step} t) \quad (2.1)$$

where

- P = person's weight, taken as 0.7 kN (157 pounds) for design
- α_i = dynamic coefficient for the i th harmonic force component
- i = harmonic multiple of the step frequency
- f_{step} = step frequency

Recommended values for α_i are given in Table 2.1. (Only one harmonic component of Equation (1.1) is used since all other harmonic vibrations are small in comparison to the harmonic associated with resonance.)

- A resonance response function of the form:

$$\frac{a}{g} = \frac{R\alpha_i P}{\beta W} \cdot \cos(2\pi i f_{step} t) \quad (2.2)$$

where

- a/g = ratio of the floor acceleration to the acceleration of gravity
- R = reduction factor
- β = modal damping ratio
- W = effective weight of the floor

The reduction factor R takes into account the fact that full steady-state resonant motion is not achieved for walking and that the walking person and the person annoyed are not simultaneously at the location of maximum modal displacement. It is recommended that R be

taken as 0.7 for footbridges and 0.5 for floor structures with two-way mode configurations.

For evaluation, the peak acceleration due to walking can be estimated from Equation (2.2) by selecting the lowest harmonic, i , for which the forcing frequency, $f = i \cdot f_{step}$, can match a natural frequency of the floor structure. The peak acceleration is then compared with the appropriate limit in Figure 2.1. For design, Equation (2.2) can be simplified by approximating the step relationship between the dynamic coefficient, α_i , and frequency, f , shown in Figure 2.2 by the formula $\alpha = 0.83 \exp(-0.35f)$. With this substitution, the following simplified design criterion is obtained:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o \exp(-0.35f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_o}{g} \quad (2.3)$$

where

a_p/g = estimated peak acceleration (in units of g)

a_o/g = acceleration limit from Figure 2.1

f_n = natural frequency of floor structure

P_o = constant force equal to 0.29 kN (65 lb.) for floors and 0.41 kN (92 lb.) for footbridges

The numerator $P_o \exp(-0.35f_n)$ in Inequality (2.3) represents an effective harmonic force due to walking which results in resonance response at the natural floor frequency f_n . Inequality (2.3) is the same design criterion as that proposed by Allen and Murray (1993); only the format is different.

Motion due to quasi-static deflection (Figure 1.6) and footstep impulse vibration (Figure 1.7) can become more critical than resonance if the fundamental frequency of a floor is greater than about 8 Hz. To account approximately for footstep impulse vibration, the acceleration limit a_o/g is not increased with frequency above 8 Hz, as it would be if

Table 2.1 Common Forcing Frequencies (f) and Dynamic Coefficients* (α_i)					
Harmonic i	Person Walking		Aerobics Class		Group Dancing
	f , Hz	α_i	f , Hz	α_i	f , Hz
1	1.6–2.2	0.5	2–2.75	1.5	1.5–3
2	3.2–4.4	0.2	4–5.5	0.6	—
3	4.8–6.6	0.1	6–8.25	0.1	—
4	6.4–8.8	0.05	—	—	—

*dynamic coefficient = peak sinusoidal force/weight of person(s).

Rev.
3/1/03

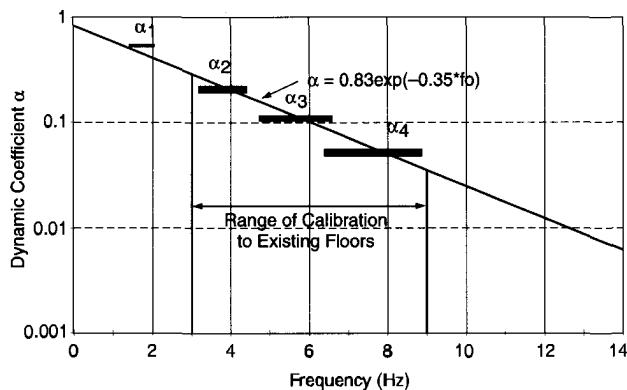


Fig. 2.2 Dynamic coefficient, α , versus frequency.

Figure 2.1 were used. That is, the horizontal portion of the curves between 4 Hz and 8 Hz in Figure 2.1 are extended to the right beyond 8 Hz. To account for motion due to varying static deflection, a minimum static stiffness of 1 kN/mm (5.7 kips/inch) under concentrated load is introduced as an additional check if the natural frequency is greater than 9–10 Hz. More severe criteria for static stiffness under concentrated load are used for sensitive equipment as described in Chapter 6.

Guidelines for the estimation of the parameters used in the above design criterion for walking vibration and application examples are found in Chapter 4.

2.2.2 Rhythmic Excitation

Criteria have recently been developed for the design of floor structures for rhythmic exercises (Allen 1990, 1990a; NBC 1990). The criteria are based on the dynamic response of structural systems to rhythmic exercise forces distributed over all or part of the floor. The criteria can be used to evaluate structural systems supporting aerobics, dancing, audience participation and similar events, provided the loading function is known. As an example, Figure 2.3 shows a time record of the dynamic loading function and an associated spectrum for eight people jumping at 2.1 Hz. Table 2.1 gives common forcing frequencies and dynamic coefficients for rhythmic activities.

The peak acceleration of the floor due to a harmonic rhythmic force is obtained from the classical solution by assuming that the floor structure has only one mode of vibration (Allen 1990):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3\alpha_i w_p / w_t}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_n}{f}\right)^2 - 1\right]^2 + \left[\frac{2\beta f_n}{f}\right]^2}} \quad (2.4)$$

where

- a_p/g = peak acceleration as a fraction of the acceleration due to gravity
- α_i = dynamic coefficient (see Table 2.1)
- w_p = effective weight per unit area of participants distributed over floor panel
- w_t = effective distributed weight per unit area of floor panel, including occupants
- f_n = natural frequency of floor structure
- f = forcing frequency
- $= i \cdot f_{step}$ where f_{step} is the step frequency
- β = damping ratio

Equation (2.4) can be simplified as follows:

At resonance ($f_n = f$):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3}{2\beta} \cdot \frac{\alpha_i w_p}{w_t} \quad (2.5a)$$

Above resonance ($f_n > 1.2f$):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3}{(f_n/f)^2 - 1} \cdot \frac{\alpha_i w_p}{w_t} \quad (2.5b)$$

Most problems occur if a harmonic forcing frequency, $f = i \cdot f_{step}$, is equal to or close to the natural frequency, f_n , for which case the acceleration is determined from Equation (2.5a). Vibration from lower harmonics (first or second), however, may still be substantial, and the acceleration for a lower harmonic is determined from Equation (2.5b). The effective maximum acceleration, accounting for all harmonics, can then be estimated from the combination rule (Allen 1990a):

$$a_m = [\sum a_i^{1.5}]^{1/1.5} \quad (2.6)$$

where

a_i = peak acceleration for the i 'th harmonic.

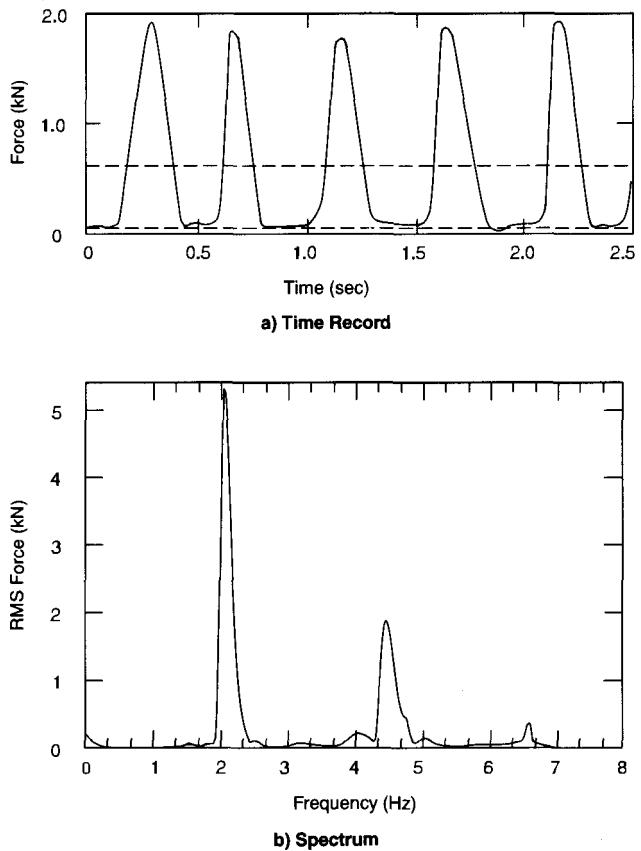


Fig. 2.3 Example loading function and spectrum from rhythmic activity.

The effective maximum acceleration determined from Equation (2.6) can then be compared to the acceleration limit for people participating in the rhythmic activity (approximately 5 percent gravity from Figure 2.1). Experience shows, however, that many problems with building vibrations due to rhythmic exercises concern more sensitive occupancies in the building, especially for those located near the exercising area. For these other occupancies, the effective maximum acceleration, a_m , calculated for the exercise floor should be reduced in accordance with the vibration mode shape for the structural system, before comparing it to the acceleration limit for the sensitive occupancy from Figure 2.1.

The dynamic forces for rhythmic activities tend to be large and resonant vibration is generally too great to be reduced practically by increasing the damping and or mass. This means that for design purposes, the natural frequency of the structural system, f_n , must be made greater than the forcing frequency, f , of the highest harmonic that can cause large resonant vibration. Equation (2.5b) can be inverted to provide the following design criterion (Allen 1990a):

$$f_n \geq f \sqrt{1 + \frac{k}{(a_o/g)} \frac{\alpha_i w_p}{w_t}} \quad (2.7)$$

where

k = constant (1.3 for dancing, 1.7 for lively concert or sports event, 2.0 for aerobics)

a_o/g = acceleration limit (0.05, or less, if sensitive occupancies are affected)

and the other parameters are defined above. Careful analysis by use of Equations (2.5) and (2.6) can provide better guidance than Equation (2.7), as for example if resonance with the highest harmonic is acceptable because of sufficient mass or partial loading of the floor panel.

Guidance on the estimation of parameters, including building vibration mode shape, and examples of the application of Equations (2.5) to (2.7) are given in Chapter 5.