UNIVERSITAS INDONESIA

ANALISIS PERIODE GETAR DAN REDAMAN STRUKTUR GEDUNG ENGINEERING CENTER BERDASARKAN DATA PENGUKURAN VIBRASI

SKRIPSI

RADEA ARIYADIRA

0706266544

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

DEPOK

JUNI 2011

1045/FT.01/SKRIP/07/2011

UNIVERSITAS INDONESIA

ANALISIS PERIODE GETAR DAN REDAMAN STRUKTUR GEDUNG ENGINEERING CENTER BERDASARKAN DATA PENGUKURAN VIBRASI

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

RADEA ARIYADIRA

0706266544

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama	**: Radea Ariyadira**
NPM	**: 0706266544**
Tanda Tangan	**:**
Tanggal	**: 30 Juni 2011**

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Radea Ariyadira

NPM : 0706266544

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Skripsi : Analisis Periode Getar dan Redaman Struktur Gedung Engineering Center Berdasarkan Data Pengukuran Vibrasi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.-Ing. Josia Irwan Rastandi, ST., MT (.....)

Penguji : Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA ( )

Penguji : Ir. Essy Arijoeni, M.Sc., Ph.D ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah dan karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penyusunan skripsi ini penulis lakukan dalam rangka memenuhi persyaratan studi program S1 Reguler Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil Universitas Indonesia.

Pada penulisan skripsi ini, penulis telah mendapatkan banyak kritik, saran, masukan, bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Maka dari itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr.-Ing. Josia Irwan Rastandi, ST, MT selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan skripsi ini.
2. Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA dan Ir. Essy Arijoeni, M.Sc., Ph.D selaku dosen penguji.
3. Ir. Heddy R. Agah, M.Eng selaku dosen pembimbing akademis.
4. Para dosen Departemen Teknik Sipil UI yang telah memberikan banyak ilmu.
5. Bapak Bambang Prayitno, Bapak Sigit dan semua pihak dari BMKG yang sudah bersedia meluangkan waktunya untuk melakukan tes vibrasi ini.
6. Si kembar Geovannie Lukas dan Geraldie Lukman, serta Mustofa Rifki sebagai teman seperjuangan dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Mba Dian yang telah sangat direpotkan dalam pelaksanaan sidang skripsi ini.
8. Teman-teman Teknik Sipil dan Lingkungan 2007 yang telah membantu penulis saat pengambilan data yang juga banyak memberikan dukungan dan semangat.

Ucapan terima kasih terkhusus untuk Papa (Harwoyo) Mama (Yeni Heryani) dan kakak-kakakku (Wina Pusparani dan Tantra Wahardika)

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

yang selalu memanjatkan doa, memberikan semangat dan nasihat bijak serta dukungan moril tiada henti.

Penulis menyadari penulisan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu dengan segala kerendahan hati penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun. Penulis mengharapkan semoga skripsi ini bermanfaat khususnya bagi penulis dan pembaca pada umumnya serta dapat memberikan kontribusi pada dunia ilmu pengetahuan.

Jakarta, 30 Juni 2011

Radea Ariyadira

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademika Universitas Indonesia, Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Radea Ariyadira
NPM : 0706266544
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-excusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Analisa Periode Getar Dan Redaman Struktur Gedung Engineering Center Berdasarkan data Pengukuran Vibrasi

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 30 Juni 2011

Yang menyatakan,

(Radea Ariyadira)

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

ABSTRAK

Nama : Radea Ariyadira

Program Studi : Teknik Sipil

Judul : Analisis Periode Getar dan Redaman Struktur Gedung Engineering Center Berdasarkan Data Pengukuran Vibrasi

Analisis modal secara teoritis dan eksperimen dilakukan pada penelitian ini untuk medapatkan parameter dinamik, yaitu periode getar dan rasio redaman struktur. Objek pada penelitian ini adalah gedung Engineering Center yang merupakan struktur beton bertulang tiga lantai yang terletak di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Struktur dimodelkan secara tiga dimensi dengan menggunakan proram ETABS 9.5 untuk memperoleh periode getar struktur secara teoritis. Kemudian dilakukan tes vibrasi dengan menggunakan *free vibration test* untuk memperoleh periode getar dan rasio redaman struktur secara eksperimen. Struktur diberikan eksitasi berupa *human induced vibration* untuk membuat struktur bergetar kemudian respon struktur direkam menggunakan *microtremor* dengan sensor *accelerometer*. Hasil dari eksperimen ini mampu mengidentifikasi empat mode dari struktur, yaitu mode pertama, mode ke-7, mode ke-13, dan mode ke-28. Hasil yang diperoleh adalah periode getar hasil eksperimen nilainya relatif lebih kecil rata-rata 14 % dibandingkan periode getar hasil pemodelan. Sementara rasio redaman struktur yang diperoleh dari hasil eksperimen sekitar 2,10 %.

Kata kunci :
Periode getar, redaman, parameter dinamik, *microtremor*, *free vibration test*, analisis modal, Engineering Center.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

ABSTRACT

Name : Radea Ariyadira

Study Program: Civil Engineering

Title : Natural Period and Damping Analysis of Engineering Center Building Structure Based on Vibration Measurement Data

Theoritical and experimental modal analysis were conducted in this study to obtain the dynamic parameters of structure, such as natural period and damping ratio. The object in this study is Engineering Center Building, a three-storey reinforced concrete structure located at the Faculty of Engineering, Universitas Indonesia. The structure was modeled in three dimensional using ETABS 9.5 to obtain natural period theoritically. Vibration test was then performed using free vibration test to obtain natural period and damping ratio experimentally. The Structure excited by human induced vibration to make the structure vibrate and then the response of structure measured using microtremor with an accelerometer sensor. The result of this experiment is able to identify four modes of the structure, as follows the 1^{st}, 7^{th}, 13^{th}, and 28^{th} mode. The result indicates that the average experimental natural period shows relatively smaller value of 14 % than the modeled natural period. While the experimental damping ratio of the structure has the value of 2,10 %.

Key words:
Natural period, damping, dynamic parameter, microtremor, free vibration test, modal analysis, Engineering Center.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS ..... **ii**
HALAMAN PENGESAHAN ..... **iii**
KATA PENGANTAR ..... **iv**
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ..... **vi**
ABSTRAK ..... **vii**
ABSTRACT ..... **viii**
DAFTAR ISI ..... **ix**
DAFTAR GAMBAR ..... **xi**
DAFTAR TABEL ..... **xiii**
DAFTAR SIMBOL ..... **xiv**

BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Perumusan Masalah 3
1.3. Tujuan Penelitian 3
1.4. Hipotesis 3
1.5. Pembatasan Masalah 4
1.6. Sistematika Penulisan 4

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA **6**
2.1. Literatur Review 6
2.2. Derajat Kebebasan (*Degree of Freedom*) 11
2.2.1. Sistem Derajat Kebebasan Tunggal (SDOF) 11
2.2.2. Sistem Derajat Kebebasan Majemuk (MDOF) 12
2.3. Parameter Dinamik 14
2.3.1. Periode Getar 14
2.3.2. Redaman 15
2.3.3. Mode Getar 18
2.4. Getaran 18
2.4.1. Getaran Bebas Pada Struktur MDOF 18
2.4.2. Getaran Paksa Pada Struktur MDOF 20
2.4.2.1. Respon Struktur MDOF Terhadap Gaya Harmonik 20
2.4.2.2. Respon Struktur MDOF Terhadap Impuls 21
2.5. Analisa Modal 22
2.5.1. Analisa Modal Untuk Sistem Tanpa Redaman 22
2.5.2. Analisa Modal Untuk Sistem Dengan Redaman 24
2.5.3. Ekspansi Modal Untuk Vektor p(t) = sp(t) 25
2.5.4. Analisa Modal Untuk p(t) = sp(t) 26
2.5.5. Jumlah Moda Yang Dibutuhkan Dalam Analisa Modal 26
2.6.1. Mekanisme Eksitasi 29
2.6.2. Mekanisme Pembacaan 29
2.6.3. Mekanisme Akuisisi Data Dan Pengolahan 30
2.6.4. *Ambient Vibration Test* 31
2.6.5. *Free Vibration Test* 32

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

2.6.6. *Forced Vibration Test* 32
2.6.7. *Frequency Respon Function* 33

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 36
3.1. Gambaran Umum 36
3.2. Simulasi/Pemodelan 37
3.2.1. Penentuan Data Geometri Struktur 37
3.2.2. Pemodelan Struktur 38
3.2.3. Analisa Modal 40
3.3. Eksperimen 40
3.3.1. Penentuan Lokasi Beban Dan *Microtremor* 40
3.3.2. Instalasi 41
3.3.3. Tes Vibrasi 42
3.3.4. Data hasil Pengukuran 42
3.4. Evaluasi 44

BAB 4 ANALISIS DAN HASIL PENELITIAN 46
4.1. Hasil Pemodelan 46
4.2. Hasil Eksperimen 49
4.2.1. Tanpa Eksitasi 50
4.2.2. Eksitasi Berupa Pukulan *Hammer* 51
4.2.2.1.Eksitasi Pada Arah X (Timur – Barat) 52
4.2.2.2.Eksitasi Pada Arah Y (Utara – Selatan) 56
4.2.2.1.Eksitasi Pada Arah Z 60
4.2.3. Eksitasi Berupa Lompatan 64
4.3. Analisis Hasil Pemodelan Dan Eksperimen 66

BAB 5 PENUTUP 70
5.1. Kesimpulan 70
5.2. Saran 70

DAFTAR REFERENSI 72

LAMPIRAN

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Gedung The National Health and Welfare Headquarters 6
Gambar 2.2. Lokasi Penempatan *Transducer* 7
Gambar 2.3. Gedung Engineering School di University of Auckland 7
Gambar 2.4. Penempatan *Shaker* dan *Accelerometer* pada Tes No.1 8
Gambar 2.5. Penempatan *Shaker* dan *Accelerometer* pada Tes No.2 8
Gambar 2.6. Penempatan *Shaker* dan *Accelerometer* pada Tes No.3 9
Gambar 2.7. Penempatan *Shaker* dan *Accelerometer* pada Tes No.4 9
Gambar 2.8. Field Shaker (a) Eccentric Mass Shaker dan (b) Linear Shaker 10
Gambar 2.9. Sistem SDOF (a) Akibat Beban p(t) 11
(b) Akibat Percepatan Gempa 11
Gambar 2.10. Modelisasi Struktur SDOF 12
Gambar 2.11. Modelisasi Struktur MDOF 13
Gambar 2.12. Respon Percepatan dari Sistem yang Bergetar Bebas 16
Gambar 2.13. Definisi *Half Power Bandwidth* 17
Gambar 2.14. Kurva Respon Frekuensi 17
Gambar 2.15. Mekanisme Tes *Experimental Modal Analysis (EMA)* 28
Gambar 2.16. Sistem dengan Input Tunggal dan Output Tunggal 33
Gambar 2.17. Hubungan Nilai FRF dengan Frekuensi Natural 34
Gambar 2.18. Analisa Individual Per-Moda dengan FRF 34
Gambar 3.1. Denah Gedung Engineering Center Bagian Utara 38
Gambar 3.2. Gedung Engineering Center 38
Gambar 3.3. Tampak 3D Gedung Engineering Center 39
Gambar 3.4. Denah Struktur Lantai Dasar Gedung Engineering Center 39
Gambar 3.5. Denah Struktur Lantai 1 dan 2 Gedung Engineering Center 39
Gambar 3.6. Lokasi Pemberian Eksitasi dan Penempatan *Microtremor* 41
Gambar 3.7. *Microtremor* dan *Data Acquisition System* 41
Gambar 3.8. Microtremor dengan Sensor *Acceleration*, *Data Acquisition System*, dan Laptop 42
Gambar 3.9. Contoh Hasil Pengukuran Tes Vibrasi (*Time Domain*) 43
Gambar 3.10. Contoh Hasil Pengukuran Tes Vibrasi (*Frequency Domain*) 44
Gambar 3.11. Diagram Alir Penelitian 45
Gambar 4.1. Mode Pertama Struktur Gedung Engineering Center 46
Gambar 4.2. Mode Ketujuh Struktur Gedung Engineering Center 47
Gambar 4.4. Mode Kedua Puluh Delapan Struktur Gedung Engineering Center 48
Gambar 4.6. *Time History* untuk Kondisi Tanpa Eksitasi 50
Gambar 4.7. FRF untuk Kondisi Tanpa Eksitasi 50
Gambar 4.8. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 1 52
Gambar 4.9. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 1 52
Gambar 4.10. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 1 53
Gambar 4.11. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 2 54
Gambar 4.12. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 2 54
Gambar 4.13. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 2 55
Gambar 4.14. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 1 56
Gambar 4.15. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 1 56
Gambar 4.16. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 1 57

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Gambar 4.17. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 2..... 58
Gambar 4.18. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 2..... 58
Gambar 4.19 FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 2 59
Gambar 4.20. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 1 60
Gambar 4.21. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 1 60
Gambar 4.22. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 1 61
Gambar 4.23. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 2 62
Gambar 4.24. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 2 62
Gambar 4.25. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 2 63
Gambar 4.26. Pemberian Eksitasi Lompatan 64
Gambar 4.27. *Time History* untuk Eksitasi Lompatan 64
Gambar 4.28. FRF untuk Eksitasi Lompatan 65

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Nilai Rasio Redaman untuk Beberapa Tipe dan Kondisi Struktur 15
Tabel 3.1. Jenis Eksitasi yang Diberikan pada Struktur..... 40
Tabel 4.1. Dua Puluh Delapan Mode Getar Pertama Struktur Gedung Engineering Center..... 48
Tabel 4.3. Perbandingan Periode Getar Hasil Eksperimen dan Pemodelan 68
Tabel 4.4. Perbandingan Rasio Redaman Hasil Eksperimen..... 69

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

DAFTAR SIMBOL

SIMBOL ROMAWI

c : redaman

C : matriks redaman

C_n : matriks redaman terdiagonalisasi

$D_n(t)$: deformasi mode ke-n untuk sistem SDOF

e_j : margin error

f_n : frekuensi alami *cyclic*

$F(\omega)$: input gaya

$H_{pi}(\omega)$: fungsi receptance yang menghubungkan pembebanan pada titik-i dan lendutan pada titik-p

k : kekakuan

K : matriks kekakuan

K_n : matriks kekakuan terdiagonalisasi

m : massa

M : matriks massa

M_n : matriks massa terdiagonalisasi

$p(t)$: vektor gaya

q : vektor modal koordinat

$\dot{q}$: vektor kecepatan modal koordinat

$\ddot{q}$: vektor percepatan modal koordinat

$r_n(t)$: respon dari mode ke-n

r^{st} : respon statik akibat gaya s

$\overline{r_n}$: faktor kontribusi moda ke-n

s : distribusi spasial

T : periode getar

u : vektor perpindahan

$\dot{u}$: vektor kecepatan

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

$\ddot{u}$: vektor percepatan

$X(\omega)$: respon perpindahan

SIMBOL YUNANI

Γ : matriks transformasi koordinat

ζ : rasio redaman

Φ : matriks mode getar

φ_{in} : moda getar moda ke-n pada titik-i dimana bekerja gaya pada titik-i

φ_{pn} : moda getar moda ke-n pada titik-i dimana bekerja gaya pada titik-i

ϕ_n : mode getar ke-n

ω_n : frekuensi natural ke-n

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Struktur adalah kombinasi dari bermacam-macam bagian yang diikat bersama-sama untuk menciptakan suatu kerangka yang mendukung, yang dapat menjadi bagian dari sebuah bangunan, kapal, mesin, atau beberapa sistem lainnya. Sebelum Revolusi Industri dimulai, struktur biasanya memiliki massa yang sangat besar karena penggunaan material kayu, coran dan batu dalam fabrikasinya. Selain itu, besarnya eksitasi getaran kecil sehingga respon dinamik dari struktur sangat rendah. Namun selama 200 tahun terakhir, dengan munculnya material yang kuat namun cenderung ringan seperti baja dan aluminium serta meningkatnya pengetahuan manusia tentang sifat material dan pembebanan pada struktur, massa struktur yang dibangun menjadi lebih ringan. Hal ini menyebabkan respon struktur terhadap eksitasi dinamis menjadi lebih besar dan tidak dapat diabaikan. Eksitasi dinamis ini menyebabkan getaran pada struktur. Getaran yang terjadi pada struktur bangunan adalah getaran yang tidak diinginkan karena getaran ini dapat menyebabkan kelelahan dan kegagalan pada struktur serta penurunan performa/kinerja struktur. Oleh karena itu penting untuk melakukan analisa dinamik pada setiap struktur.

Pada analisa dinamik terdapat tiga parameter utama, yaitu periode getar, redaman, dan mode getar. Periode getar adalah waktu yang diperlukan oleh struktur untuk melakukan satu getaran penuh. Suatu struktur biasanya mempunyai sejumlah periode getar, dimana periode getar yang terpanjang disebut periode dasar atau periode alami (*fundamental period*). Redaman merupakan peristiwa pelepasan energi (*energy dissipation*) oleh struktur akibat adanya berbagai macam sebab. Karena redaman berfungsi melepaskan energi, maka hal ini akan mengurangi respon struktur. Sedangkan mode getar merupakan karakteristik defleksi yang terjadi pada struktur akibat beban dinamik. Setiap struktur memiliki banyak mode getar yang bersesuaian dengan banyaknya frekuensi alami struktur. Tujuan dari penentuan parameter dinamik adalah untuk memperkirakan respon struktur di bawah kondisi resonansi (Beck 1980).

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Dalam melakukan analisa dinamik ini dilakukan pemodelan struktur. Tujuan dari pemodelan struktur ini adalah untuk membatasi jumlah DOF (*degree of freedom*). Modelisasi struktur ini terdiri dari pemodelan struktur geser dan struktur fleksibel. Modelisasi struktur geser ini menganggap lantai (balok) kaku sekali (tak terhingga) dibandingkan kolom sehingga tidak terjadi putaran sudut pada pertemuan balok dan kolom. Jadi struktur hanya mengalami perpindahan akibat geser saja. Anggapan ini menyebabkan struktur geser hanya mempunyai satu derajat kebebasan pada setiap lantainya sehingga perhitungannya akan lebih mudah dilakukan. Modelisasi struktur yang kedua adalah modelisasi struktur fleksibel. Modelisasi ini menganggap kekakuan balok dan kolom tidak tak terhingga, dengan demikian akan terjadi putaran sudut pada pertemuan balok dan kolom. Jadi struktur selain mengalami perpindahan akibat gaya geser juga mengalami putaran sudut sehingga struktur fleksibel mempunyai tiga derajat kebebasan pada setiap lantainya. Hal ini akan menyebabkan perhitungan secara manual akan lebih sulit dikerjakan, baik dengan cara analisa beban statik ekivalen maupun analisa dinamik.

Salah satu cara untuk mendapatkan parameter dinamik struktur adalah dengan melakukan tes vibrasi. Tes vibasi pada umumnya terdiri dari dua jenis, yaitu *laboratoy scale structures* dan *full scale structures*. Hasil tes pada skala laboratorium ini tidak dapat menjelaskan kompleksitas dalam struktur seperti pengaruh non struktural komponen, efek dari kondisi lingkungan yang berbeda, dan interaksi tanah dengan struktur. Sedangkan hasil tes pada skala penuh menampilkan informasi dari struktur dengan kondisi batas (*boundary conditions*) yang sesuai. Hasil dari pengujian skala penuh juga dapat membantu dalam mengembangkan pemodelan matematika yang mampu mewakili perilaku struktur sebenarnya. Untuk pengujian skala penuh dapat dilakukan dengan *ambient vibration tests* atau *forced vibration tests* (Sawalu dan Williams 1995). Pada *ambient vibration tests*, eksitasi yang digunakan merupakan eksitasi sembarang, seperti angin, pejalan kaki atau kendaraan lalu lintas, dan gempa. Sedangkan pada *forced vibration tests*, eksitasi yang digunakan dapat berupa beban harmonik, beban periodik, maupun beban impuls.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Dari tes vibrasi ini akan didapatkan parameter dinamik yang real dari struktur sehingga dapat dilakukan verifikasi antara parameter dinamik yang didapat secara numerik pada tahap desain dengan parameter dinamik yang didapat secara eksperimen.

1.2. Perumusan Masalah

Pada penelitian ini, rumusan masalah yang akan dibahas antara lain :

1. Berapakah periode getar gedung Engineering Center hasil dari pemodelan struktur dan tes vibrasi?
2. Berapakah rasio redaman gedung Engineering Center hasil dari tes vibrasi?
3. Bagaimanakah perbandingan parameter dinamik (periode getar dan rasio redaman) gedung Engineering Center yang diperoleh dari hasil pemodelan dan tes vibrasi?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui periode getar gedung Engineering Center hasil dari pemodelan struktur dan tes vibrasi.
2. Mengetahui rasio redaman gedung Engineering Center hasil dari tes vibrasi.
3. Mengetahui perbandingan parameter dinamik (periode getar dan rasio redaman) gedung Engineering Center yang diperoleh dari hasil pemodelan dan tes vibrasi.

1.4. Hipotesis

Periode getar gedung Engineering Center hasil dari pemodelan struktur dan tes vibrasi akan menunjukkan hasil yang identik. Serta berdasarkan literatur, rasio redaman gedung Engineering Center yang diperoleh dari hasil tes vibrasi berkisar antara 2–5%.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

1.5. Pembatasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Struktur yang akan dicari parameter dinamiknya adalah Gedung Engineering Center bagian utara yang terletak di Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
2. Sistem struktur berperilaku linear.
3. Parameter dinamik yang akan dicari adalah periode getar dan rasio redaman struktur.
4. Pemodelan struktur menggunakan program ETABS 9.5 untuk memperoleh parameter dinamik secara teoritis dan menggunakan program Geopsy untuk memperoleh parameter dinamik secara eksperimen.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari 5 (lima) bab, yaitu :

BAB 1 : PENDAHULUAN

Pada bab ini antara lain membahas mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, hipotesis, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2 : DASAR TEORI

Pada bab ini membahas mengenai dasar–dasar teori tentang dinamika struktur serta *experimental modal analysis* yang membantu pembuatan skripsi ini.

BAB 3 : METODOLOGI PENELITIAN

Pada metodologi penelitian dijelaskan hal-hal apa saja yang dilakukan dalam penelitian ini serta langkah kerjanya.

BAB 4 : ANALISA DAN HASIL

Berisi proses analisa dan diskusi mengenai hasil yang dilakukan terhadap pemodelan struktur pada piranti lunak

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

yang telah disebutkan mengenai parameter dinamik yang diperoleh dan membandingkan hasilnya dengan parameter dinamik yang diperoleh dari hasil pengukuran langsung di lapangan

BAB 5 : KESIMPULAN

Berisi penarikan kesimpulan dari hasil keseluruhan penelitian yang dilakukan serta pengemukaan saran-saran yang diperlukan untuk kelanjutan penelitian.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

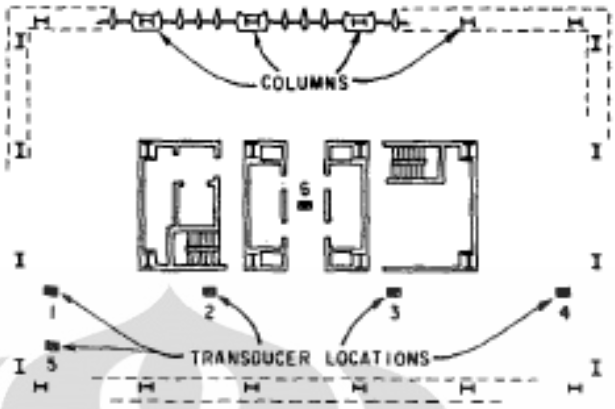
2.1. Literatur Review

Penelitian tentang tes vibrasi pernah dilakukan sebelumnya oleh R. Crawford dan H.S. Ward yang dipublikasikan dalam *Bulletin of The Seismology of America*. Vol. 54, No 6, pp. 1743-1756, December, 1964. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai periode getar alami struktur untuk dibandingkan dengan hasil pemodelan matematik dengan menggunakan eksitasi sembarang berupa angin. Bangunan yang menjadi objek penelitian adalah The National Health and Welfare Headquarters yang terletak di Tunney's Pasture, Ottawa.

Gambar 2.1. Gedung The National Health and Welfare Headquarters

Dalam penelitian ini menggunakan seismometer Willmore Mark II, yaitu berupa transduser elektromagnetik. Transduser ini diletakkan di lantai 7 diberbagai lokasi. Mode getar lateral diperoleh dengan menempatkan transduser di bagian pusat bangunan dan mode getar torsional diperoleh dengan menempatkan transduser di luar pusat bangunan. Dari penelitian ini diperoleh nilai periode getar alami struktur yang berbeda sekitar 3% dari perhitungan hasil pemodelan matematik.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011



Gambar 2.2. Lokasi Penempatan *Transducer*

Selain itu tes vibrasi juga pernah dilakukan oleh F. Shabbir dan P. Omenzetter dalam "Forced Vibration Testing of a Thirteen Storey Concrete Building". Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui frekuensi sistem dalam berbagai arah yang dilakukan pada bangunan 13 lantai yang terdapat di University of Auckland.

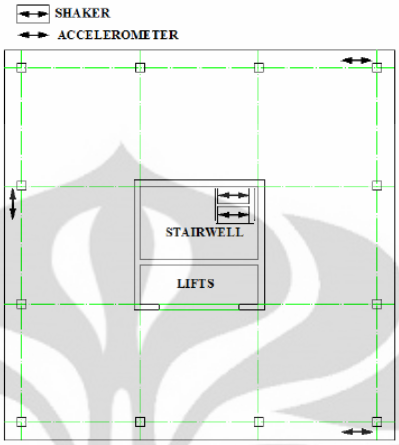
Gambar 2.3. Gedung Engineering School di University of Auckland

Empat pengujian dilakukan dalam tes ini, yaitu :

1. Tes no. 1, struktur diberi gaya pada arah utara-selatan untuk memperoleh respon translasi. Dua buah *shaker* ditempatkan di bagian tengah struktur, dekat dengan pusat gesernya, dan frekuensi beban yang diberikan 1,5 Hz-

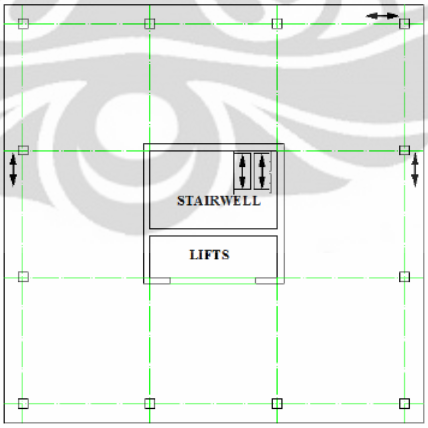
Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

3,5 Hz. Untuk menentukan mode getar, delapan *accelerometers* juga ditempatkan di delapan lantai teratas dari bangunan.



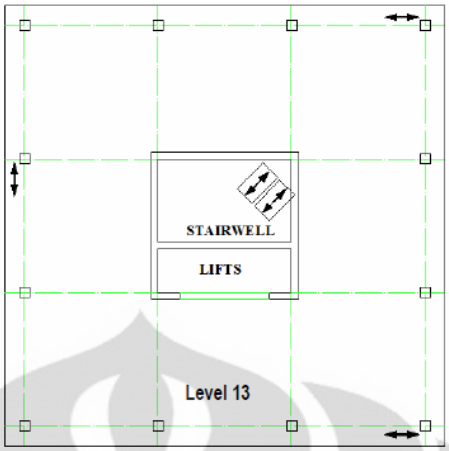
Gambar 2.4. Penempatan *Shaker* dan *Accelerometer* pada Tes No.1

2. Tes no. 2, struktur diberi gaya pada arah timur-barat. Dua buah *shaker* ditempatkan di bagian tengah struktur dengan frekuensi beban sama seperti pada tes no. 1. Untuk menentukan mode getar, delapan *accelerometers* juga ditempatkan di delapan lantai teratas dari bangunan.



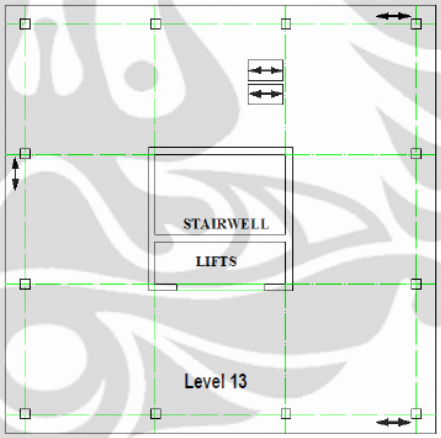
Gambar 2.5. Penempatan *Shaker* dan *Accelerometer* pada Tes No.2

3. Tes no. 3, struktur diberi gaya pada arah diagonal dengan menempatkan dua buah *shaker* pada arah 45^0 dari bagian tengah struktur.



Gambar 2.6. Penempatan *Shaker* dan *Accelerometer* pada Tes No.3

4. Tes no. 4, *shaker* ditempatkan di luar bagian tengah struktur untuk menghasilkan respon torsional predominan. Frekuensi beban yang diberikan 2,20-2,55 Hz.



Gambar 2.7. Penempatan *Shaker* dan *Accelerometer* pada Tes No.4

Dari pengujian ini diperoleh tiga mode getar pertama dari struktur, yaitu mode translasi pertama pada arah timur-barat sebesar 1,76 Hz, mode translasi pertama pada arah utara-selatan sebesar 1,88 Hz, dan mode torsional pertama sebesar 2,45 Hz. Selain itu dari pengujian ini dapat membuktikan bahwa pemberian gaya yang relatif kecil dapat digunakan secara efektif untuk memperoleh mode getar struktur secara global.

Selain itu tes vibrasi juga dilakukan oleh Eunjong Yu et.al (2006) dalam *Forced Vibration Testing Of A Four Story RC Building Utilizing The Ness@UCLA Mobile Field Laboratory*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan frekuensi natural dan mode getar pada bangunan yang telah mengalami kerusakan akibat gempa dengan menggunakan *ambient vibration test* dan *forced vibration test*. Bangunan yang menjadi obyek penelitian adalah Gedung Four Seasons yang terletak di Sherman Oaks, California. Gedung ini mengalami kerusakan akibat gempa Northridge pada tahun 1994.

Pada tes vibrasi ini menggunakan dua buah *eccentric mass shakers* dan *linear shaker*. *Eccentric mass shakers* diletakkan di bagian utara dan selatan pada atap gedung sebagai sumber getaran. Penempatan ini bertujuan untuk memaksimalkan eksitasi torsional yang juga memungkinkan eksitasi translasi pada arah utara-selatan dan timur-barat. Sedangkan *linear shaker* diletakkan pada arah 45^{o} utara-selatan dari titik referensi. Dari tes ini diperoleh enam frekuensi alami pertama beserta mode getarnya. Dari data pengukuran *ambient vibration test* sebelum dan sesudah pengukuran dengan *eccentric mass shaker test*, frekuensi alaminya mengalami penurunan sebanyak 3%. Frekuensi natural fundamental hasil pengukuran dengan *eccentric mass shaker* bernilai 70% sampai 75% dari hasil pengukuran *ambient vibration test* dan bernilai 92% sampai 93% dengan hasil pengukuran *linear shaker test*.

(a) (b)

Gambar 2.8. Field Shaker (a) Eccentric Mass Shaker dan (b) Linear Shaker

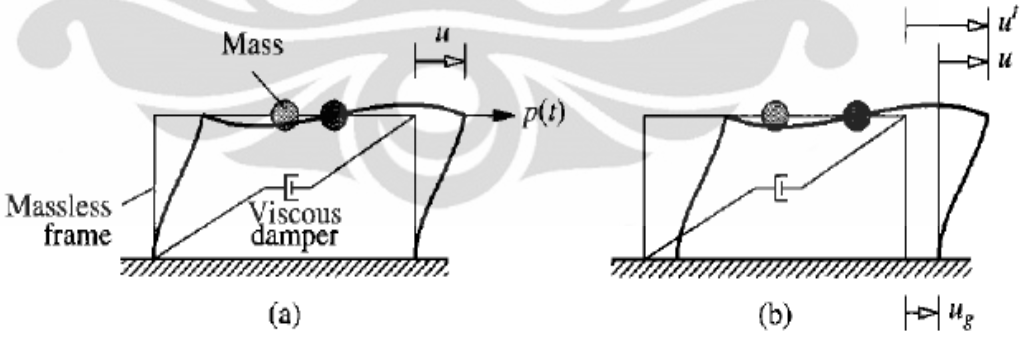
2.2. Derajat Kebebasan (*Degree of Freedom*)

Derajat kebebasan (*degree of freedom*) adalah derajat impedensi yang diperlukan untuk menyatakan posisi suatu sistem pada setiap saat. Dalam model sistem SDOF atau berderajat kebebasan tunggal, setiap massa m, redaman c, kekakuan k, dan gaya luar dianggap tertumpu pada elemen fisi tunggal. Struktur yang mempunyain n-derajat kebebasan atau struktur dengan derajat kebebasan banyak disebut *multi degree of freedom* (MDOF). Akhirnya dapat disimpulkan bahwa jumlah derajat kebebasan adalah jumlah koordinat yang diperlukan untuk menyatakan posisi suatu massa pada saat tertentu.

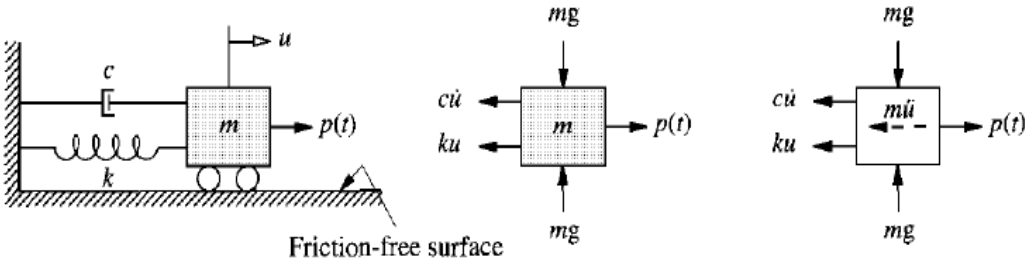
2.2.1. Sistem Derajat Kebebasan Tunggal (SDOF)

Sistem derajat kebebasan tunggal (SDOF) hanya akan mempunyai satu koordinat yang diperlukan untuk menyatakan posisi massa pada saat tertentu yang ditinjau. Bangunan satu tingkat adalah salah satu contoh bangunan derajat kebebasan tunggal.

Sistem SDOF tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Sistem terdiri dari massa (m) yang terkonsentrasi pada tingkat atap, dengan rangka massa kecil memiliki kekakuan pada sistem, dan redaman pelekat (dashpot)



Gambar 2.9. Sistem SDOF (a) Akibat Beban p(t)
(b) Akibat Percepatan Gempa



Gambar 2.10. Modelisasi Struktur SDOF

Sistem SDOF dapat dimodelkan menjadi suatu sistem massa-pegas-redaman. Dari modelisasi tersebut dapat diketahui gaya-gaya yang dialami struktur adalah :

$p(t)$ = gaya luar yang akan didistribusikan keseluruhan struktur

$F_I = m\ddot{u}$ = gaya luar komponen massa terhadap percepatan gerakan tanah

$F_d = c\dot{u}$ = gaya luar komponen redaman terhadap kecepatan gerakan tanah

$F_s = ku$ = gaya luar komponen kekakuan terhadap perpindahan gerakan tanah

Dengan menggunakan hukum kesetimbangan Newton kedua, maka dapat diperoleh persamaan gerak untuk sistem SDOF adalah :

$$P(t) = f_s + f_D + f_1 \qquad (2.2.1)$$

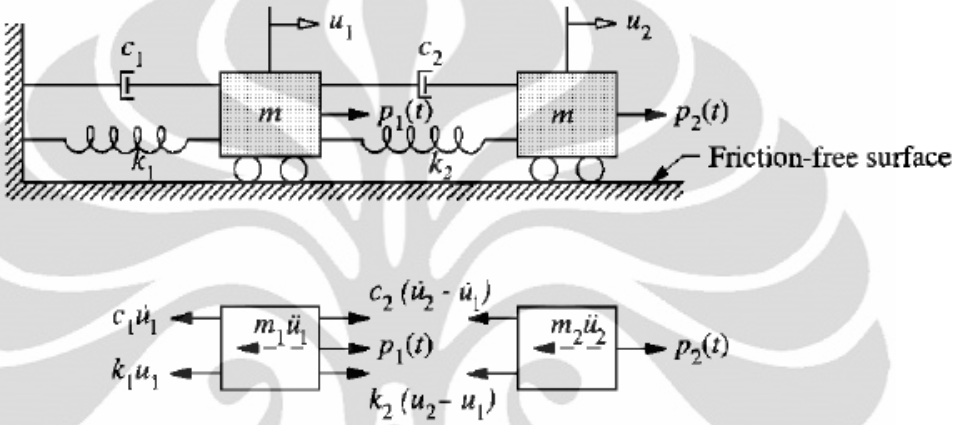
Atau dapat juga ditulis

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \qquad (2.2.2)$$

Massa keseluruhan (m) dari sistem ini dicakup dalam balok tegar terhadap percepatan pergerakan ($\ddot{u}$). Tahanan elastik terhadap perpindahan diberikan oleh pegas tanpa bobot dengan kekakuan (k) terhadap perpindahan pergerakan (u), sedang mekanisme kehilangan energi (*energy loss*) digambarkan oleh peredam (c) terhadap kecepatan pergerakan ($\dot{u}$). Mekanisme pembebanan luar yang menimbulkan respon dinamik pada sistem dengan berbentuk beban p(t) yang berubah menurut waktu.

2.2.2. Sistem Derajat Kebebasan Majemuk (MDOF)

Untuk menyatakan persamaan gerak pada struktur dengan derajat kebebasan banyak/majemuk maka digunakan anggapan dan pendekatan seperti struktur dengan derajat kebebasan tunggal SDOF. Untuk memperoleh persamaan gerak tersebut, maka tetap dipakai prinsip keseimbangan dinamik (*dynamic equilibrium*) pada suatu massa yang ditinjau. Untuk memperoleh persamaan tersebut maka diambil model struktur MDOF.



Gambar 2.11. Modelisasi Struktur MDOF

Berdasarkan pada kesetimbangan dinamik pada *free body diagram* maka akan diperoleh :

$$m_1\ddot{u}_1 + c_1\dot{u}_1 - c_2\left(\dot{u}_2 - \dot{u}_1\right) + k_1u_1 - k_2\left(u_2 - u_1\right) = p_1(t) \qquad (2.2.3)$$

$$m_2\ddot{u}_2 + c_2\left(\dot{u}_2 - \dot{u}_1\right) + k_2\left(u_2 - u_1\right) = p_2(t) \qquad (2.2.4)$$

Pada persamaan–persamaan tersebut tampak bahwa kesetimbangan dinamik suatu massa yang ditinjau ternyata dipengaruhi oleh kekakuan, redaman, dan simpangan massa sebelum dan sesudahnya. Persamaan dengan sifat-sifat seperti itu umumnya disebut *coupled equation* karena persamaan-persamaan tersebut akan bergantung satu sama lain. Penyelesaian persamaan *coupled* harus dilakukan secara simultan artinya dengan melibatkan semua persamaan yang ada. Pada struktur dengan derajat kebebasan banyak, persamaan gerakannya merupakan persamaan yang *dependent* atau *coupled* antara satu dengan yang lain.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Selanjutnya dengan menyusun persamaan-persamaan di atas menurut parameter yang sama (percepatan, kecepatan, dan simpangan) selanjunya akan diperoleh :

$$m_1\ddot{u}_1 + (c_1 + c_2)\dot{u}_1 - c_2\dot{u}_2 + (k_1 + k_2)u_1 - k_2u_2 = p_1(t)$$

$$m_2\ddot{u}_2 - c_2\dot{u}_1 + c_2\dot{u}_2 - k_1u_1 + k_2u_2 = p_2(t)$$

Persamaan – persamaan di atas dapat ditulis ke dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{Bmatrix}$$

Persamaan diatas dapat ditulis dalam matriks yang lebih kompleks

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\} \qquad (2.2.5)$$

Dimana $[M]$, $[C]$, $[K]$ berturut-turut adalah matriks massa, matriks redaman, dan matriks kekakuan struktur.

2.3. Parameter Dinamik

2.3.1. Periode Getar

Waktu yang diperlukan oleh struktur untuk melakukan suatu getaran lengkap disebut periode getar atau waktu getar struktur. Suatu struktur biasanya mempunyai sejumlah periode getar, dimana periode getar yang terpanjang disebut periode dasar atau periode alami (*fundamental period*). Pada umumnya bangunan-bangunan teknik sipil mempunyai kekakuan lateral yang beraneka ragam, sehingga mempunyai periode getar yang berlainan juga. Hubungan antara periode getar dengan frekuensi alami ω_n dan frekuensi alami *cyclic* f_n adalah sebagai berikut.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \qquad (2.3.1)$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} \qquad (2.3.2)$$

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

2.3.2. Redaman

Redaman merupakan peristiwa pelepasan energi (*energy dissipation*) oleh struktur akibat adanya berbagai macam sebab. Beberapa penyebab itu antara lain adalah pelepasan energi oleh adanya gerakan antar molekul di dalam material, pelepasan energi oleh gesekan alat penyambung maupun sistem dukungan, pelepasan energi oleh adanya gesekan dengan udara dan pada *respon inelastic* pelepasan energi juga terjadi akibat adanya sendi plastis. Karena redaman berfungsi melepaskan energi, maka hal ini akan mengurangi respon struktur. Nilai rasio redaman pada suatu struktur biasanya diestimasi dengan menggunakan data dari struktur lain yang memiliki karakteristik yang sama. Karena untuk menentukan rasio redaman yang akurat harus dilakukan secara eksperimen. Tetapi hal tersebut jarang dilakukan karena terbatasnya waktu dan budget dan untuk struktur baru yang akan dibangun hal tersebut tidak bisa dilakukan, sehingga dalam menentukan rasio redaman suatu struktur dilakukan dengan melakukan estimasi. Newmark dan Hall (1982) menentukan rekomendasi nilai rasio redaman untuk beberapa tipe dan kondisi struktur.

Tabel 2.1. Nilai Rasio Redaman untuk Beberapa Tipe dan Kondisi Struktur

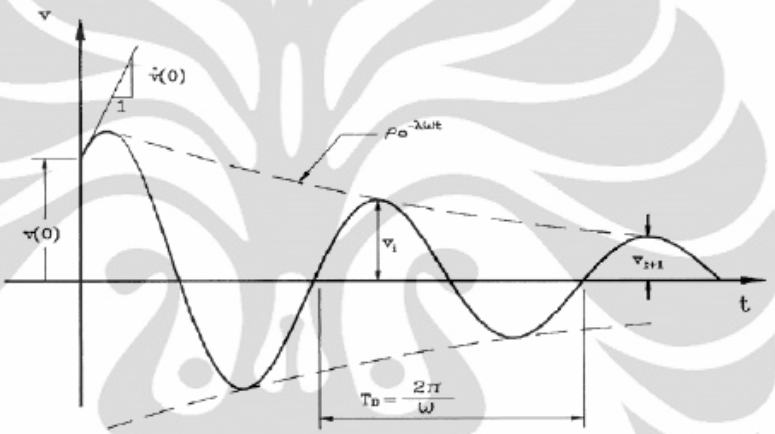
Stress Level	Type and Condition of Structure	Damping ratio (%)
Working Stress, no more than about 1/2 yield point	Welded steel, prestresed concrete, well-reinforced concrete (only sight cracking)	2 sd 5
	Reinforced concrete with considerable cracking	3 sd 5
	Bolted and/or riveted steel, wood structure with nailed or bolted joints	5 sd 7
At or just below yield point	Welded steel, prestresed concrete (without complete loss in prestress)	5 sd 7
	Prestressed concrete with no prestress left	7 sd 10
	Reinforced concrete	7 sd 10
	Bolted and/or riveted steel, wood structure with bolted joints	10 sd 15
	Wood structure with nailed joints	15 sd 20

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Karena hampir tidak mungkin menentukan rasio redaman ζ secara analisis, maka parameter tersebut harus ditentukan secara eksperimen. Tes getaran bebas merupakan suatu cara dalam menentukan rasio redaman. Untuk sistem teredam rasio redaman dapat ditentukan dari persamaan :

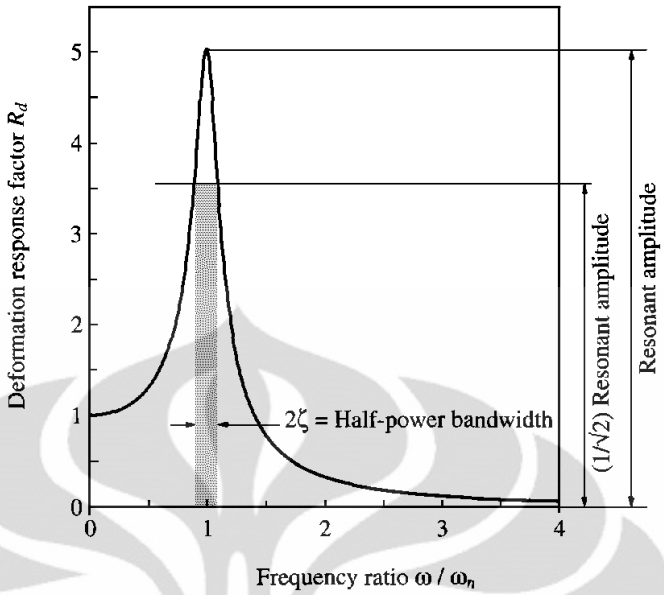
$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \text{ atau } \zeta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}} \qquad (2.3.3)$$

Rumus ini berlaku untuk respon struktur *displacement* atau *acceleration*.



Gambar 2.12. Respon Percepatan dari Sistem yang Bergetar Bebas

Rasio redaman dapat juga ditentukan dengan menggunakan kurva frekuensi respon yang didapat secara eksperimen. Definisi *half power bandwidth* dapat dilihat pada gambar.

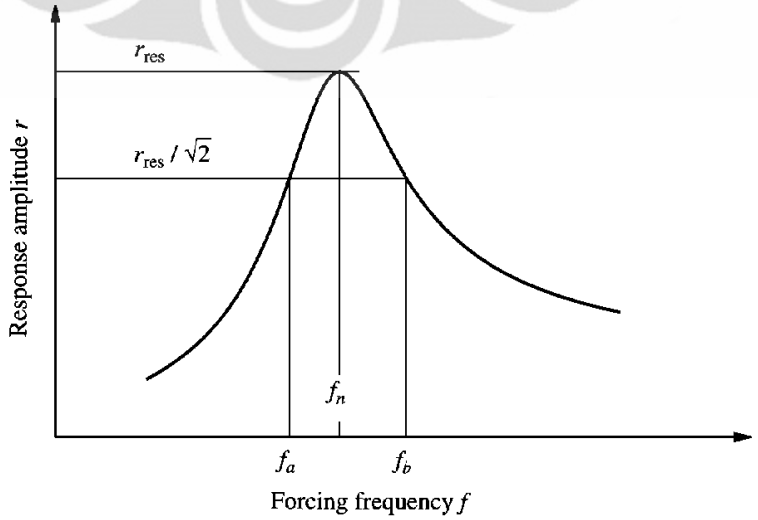


Gambar 2.13. Definisi *Half Power Bandwidth*

Jika ω_a dan ω_b adalah frekuensi gaya dari kedua sisi frekuensi resonansi dimana amplitudo u_o $1/\sqrt{2}$ kali amplitudo resonansi, maka untuk ζ yang kecil :

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_n} \quad \text{atau} \quad \zeta = \frac{f_b - f_a}{2 f_n} \tag{2.3.4}$$

Hasil ini memungkinkan untuk melakukan evaluasi rasio redaman dari *forced vibration test* tanpa harus mengetahui besarnya gaya yang diterima pada struktur.



Gambar 2.14. Kurva Respon Frekuensi

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

2.3.3. Mode Getar

Mode getar adalah suatu pola getar tertentu pada sistem MDOF akibat eksitasi dinamik. Setiap struktur hampir tidak mungkin hanya memiliki 1 derajat kebebasan tetapi sistem memiliki banyak derajat kebebasan sehingga sistem akan banyak memiliki solusi yang mengindikasikan mode getar dari sistem. Getaran bebas akan muncul pada tiap mode dengan frekuensi tertentu dan mode getar tertentu pula. Setiap mode tidak bergantung dengan mode lainnya sehingga tidak saling mempengaruhi satu sama lain. Dengan kata lain, sistem MDOF dapat diselesaikan dengan menggunakan solusi satu derajat kebebasan (SDOF) sederhana untuk mendapatkan superposisi dari respon modal.

2.4. Getaran

Getaran adalah suatu gerak bolak-balik di sekitar kesetimbangan. Kesetimbangan disini maksudnya adalah keadaan dimana suatu benda berada pada posisi diam jika tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut. Getaran ini terdiri dari dua jenis, yaitu getaran bebas dan getaran paksa.

2.4.1. Getaran Bebas Pada Struktur MDOF

Getaran bebas pada sistem MDOF tanpa redaman diformulasikan sebagai :

$$m\ddot{u} + ku = 0 \tag{2.4.1}$$

Dimana

$$u(t) = q_n(t)\phi_n \tag{2.4.2}$$

Penyelesaian permasalahan tersebut diharapkan dalam fungsi harmonik menurut bentuk :

$$q_n(t) = A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t \tag{2.4.3}$$

Dengan A_n dan B_n adalah konstanta integral yang dapat ditentukan dari kondisi awal pada persamaan gerak MDOF. Dengan mensubstitusi pers. (2.4.2) ke pers. (2.4.1) diperoleh :

$$\left[-\omega_n m\phi_n + k\phi_n\right] q_n(t) = 0$$

Persamaan ini bisa diselesaikan dengan satu dari dua cara. Yaitu $q_n(t) = 0$ yang menyatakan $u(t) = 0$ sehingga tidak ada gerakan pada sistem, atau frekuensi natural ω_n dan mode getar ϕ_n harus memenuhi persamaan :

$$k\phi_n = \omega_n^2 m\phi_n$$

$$\left[k - \omega_n^2 m\right]\phi_n = 0$$

Persamaan adalah suatu persamaan yang sangat penting dan biasa disebut persamaan *eigenproblem.* Penyelesaian persamaan tersebut akan ada nilainya apabila determinan dari matriks yang merupakan koefisien dari vektor ϕ_n adalah nol, sehingga :

$$\left|k - \omega_n^2 m\right| = 0$$

Jumlah mode pada struktur dengan derajat kebebasan banyak biasanya dapat dihubungkan dengan jumlah massa. Mode itu sendiri adalah jenis/pola/ragam getaran/goyangan suatu struktur bangunan. Mode ini hanya merupakan fungsi dari properti dinamik dari struktur yang bersangkutan (dalam hal ini adalah hanya massa dan kekakuan) dan bebas dari pengaruh waktu dan fekuensi getaran. Dengan adanya hubungan antara jumlah mode dengan jumlah massa struktur, maka bangunan yang mempunyai empat tingkat misalnya, akan mempunyai empat derajat kebebasan dan akan mempunyai empat jenis mode getaran dan akan mempunyai empat nilai frekuensi alami yang berhubungan langsung dengan jenis mode getarnya.

Respon sistem MDOF tanpa redaman terhadap getaran bebas adalah

$$u(t) = \sum_{n=1}^{N} \phi_n \left(A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t\right) \qquad (2.4.4)$$

Dengan memasukkan nilai kondisi awal dimana $u = u(0)$ dan $\dot{u} = \dot{u}(0)$ maka akan diperoleh :

$$A_n = q_n(0)$$

$$B_n = \frac{\dot{q}_n(0)}{\omega_n}$$

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Sehingga solusi lengkapnya adalah :

$$u(t) = \sum_{n=1}^{N} \phi_n \left[q_n(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{q}_n(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t \right] \tag{2.4.5}$$

Sedangkan untuk sistem MDOF dengan redaman, solusinya diberikan pada persamaan di bawah ini :

$$u(t) = \sum_{n=1}^{N} \phi_n e^{-\zeta_n \omega_n t} \left[q_n(0) \cos \omega_{nD} t + \frac{\dot{q}_n(0) + \zeta_n \omega_n q_n}{\omega_{nD}} \sin \omega_{nD} t \right] \tag{2.4.6}$$

Dengan :

$\omega_{nD} = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2}$

ζ_n = rasio redaman

2.4.2. Getaran Paksa Pada Struktur MDOF

Getaran paksa pada stuktur dapat disebabkan oleh gaya harmonik, gaya periodik, impuls, maupun gaya acak/*arbitrary force*. Pada penulisan ini hanya akan dibahas respon struktur terhadap gaya harmonik dan impuls.

2.4.2.1.Respon Struktur MDOF Terhadap Gaya Harmonik

Gaya harmonik berupa $p(t) = p_0 \sin \omega t$ atau $p_0 \cos \omega t$, dimana p_0 adalah amplitudo atau nilai maksimum dari gaya tersebut, dan ω adalah frekuensi dari gaya tersebut. Untuk sistem MDOF tanpa redaman, persamaan gerak sistem terhadap gaya harmonik diberikan oleh persamaan :

$$m\ddot{u} + ku = p_0 \sin \omega t \tag{2.4.7}$$

Dengan menetapkan nilai kondisi awal $u = u(0)$ dan $\dot{u} = \dot{u}(0)$ maka dapat diperoleh respon sistem terhadap gaya harmonik adalah :

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

$$u_n(t) = \underbrace{u(0)\cos\omega_n t + \left[\frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} - \frac{p_0}{k}\frac{\omega/\omega_n}{1-(\omega/\omega_n)^2}\right]\sin\omega_n t}_{\text{transient}} + \underbrace{\frac{p_0}{k}\frac{1}{\left[1-(\omega/\omega_n)^2\right]^2}\sin\omega t}_{\text{steady state}} \quad (2.4.8)$$

Untuk sistem MDOF dengan redaman persamaan geraknya menjadi :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \sin\omega t$$

Solusi dari persamaan ini adalah :

$$u_n(t) = \underbrace{e^{-\zeta\omega_n t}\left(u(0)\cos\omega_D t + \left[\frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} - \frac{p_0}{k}\frac{\omega/\omega_n}{1-(\omega/\omega_n)^2}\right]\sin\omega_D t\right)}_{\text{transient}} + \underbrace{\left(\frac{p_0}{k}\frac{1-(\omega/\omega_n)^2}{\left[1-(\omega/\omega_n)^2\right]^2+\left[2\zeta(\omega/\omega_n)^2\right]^2}\sin\omega t + \frac{p_0}{k}\frac{-2\zeta\omega/\omega_n}{\left[1-(\omega/\omega_n)^2\right]^2+\left[2\zeta(\omega/\omega_n)^2\right]^2}\cos\omega t\right)}_{\text{steady state}} \quad (2.4.9)$$

2.4.2.2. Respon Struktur MDOF Terhadap Impuls

Impuls adalah sebuah gaya yang sangat besar yang bekeja pada waktu yang sangat singkat. Contoh dari gaya ini adalah ledakan bom yang terjadi pada sebuah struktur bangunan. Respon struktur terhadap beban impuls adalah :

$$u_n(t) = \frac{\hat{F}}{m\omega_D} e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin\left[\omega_D(t-\tau)\right] \quad (2.4.10)$$

Dengan :

$\hat{F} = F\Delta t = mv_0$

$\omega_D = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

2.5. Analisa Modal

Analisa modal adalah suatu proses penentuan karakteristik dinamik dari suatu sistem dalam bentuk frekuensi alami, faktor redaman, dan mode getar. Analisa modal menjadi dasar mengapa respon getaran suatu sistem dapat diekspresikan sebagai kombinasi linier dari respon pada koordinat modalnya. Setiap respon pada koordinat modal tersebut dideskripsikan dalam bentuk parameter modalnya masing-masing yaitu frekuensi alami, redaman modal, dan mode getar.

Metode analisa modal banyak dikenal sebagai metode yang *powerful* dalam menghitung respon dinamik dari sistem struktur linier teredam dengan redaman klasik. Metode ini menarik karena respon sistem MDOF diekspresikan sebagai superposisi dari respon modal. Setiap modal ditentukan dari analisa dinamik sistem SDOF dan analisa dinamik ini hanya dilakukan pada mode yang memiliki kontribusi yang signifikan terhadap respon sistem.

2.5.1. Analisa Modal Untuk Sistem Tanpa Redaman

Persamaan gerak untuk sistem MDOF linear tanpa redaman dengan pembebanan dinamik adalah sebagai berikut :

$$m\ddot{u} + ku = p(t) \qquad (2.5.1)$$

Persamaan gerak ini merupakan matriks persamaan, dimana persamaan pada suatu baris pada matriks persamaan berhubungan dengan satu atau lebih persamaan baris lainnya pada matriks persamaan tersebut (*coupled equation*). Matriks persamaan tipe ini akan menuntut banyak waktu dan proses dalam penyelesaian apabila DOF struktur yang kita tinjau cukup banyak. Dikarenakan semakin banyak jumlah DOF, semakin besar dimensi matriks persamaan yang terbentuk. Sehingga untuk mempermudah proses penyelesaian, akan lebih mudah apabila persamaan gerak diatas dimodifikasi sedemikian rupa sehingga menjadi *uncoupled equations*, yaitu dengan mentransformasikan persamaan-persamaan dalam matriks ke dalam koordinat modal.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Pada sistem MDOF, vektor perpindahan dapat direpresentasikan sebagai ekspansi dari kontribusi modal-modal. Dimana jumlah modal dapat diambil sebanyak N, sehingga bentuk vektor perpindahan suatu sistem struktur adalah :

$$u(t) = \sum_{r=1}^{N} \varphi_r q_r(t) = \Phi q(t) \tag{2.5.2}$$

Untuk merubah persamaan *coupled* menjadi *uncoupled*, langkah yang diambil adalah dengan memasukkan pers. (2.5.2) ke pers. (2.5.1) dan mengalikan ${\varphi_n}^T$ pada awal setiap bagian penyusun pers. (2.5.1), maka akan didapatkan persamaan berikut :

$$\sum_{r=1}^{N} \varphi_n^T m \varphi_r \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^{N} \varphi_n^T k \varphi_r q_r(t) = \varphi_n^T p(t) \tag{2.5.3}$$

Perubahan tipe persamaan *coupled* menjadi persamaan *uncoupled* dibantu oleh sifat orgonalitas dari *eigenvector*, dimana

$$\varphi_n^T k \varphi_r = 0 \text{ dan } \varphi_n^T m \varphi_n = 0$$

Sehingga pers. (2.5.3) menjadi :

$$\left(\varphi_n^T m \varphi_n\right) \ddot{q}_n(t) + \left(\varphi_n^T k \varphi_n\right) q_n(t) = \varphi_n^T p(t)$$

Atau

$$M_n \ddot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P_n(t) \tag{2.5.4}$$

Dimana :

$M_n = \Phi^T m \Phi$

$K_n = \Phi^T k \Phi$

$P_n(t) = \Phi^T p(t)$

Dengan membagi pers. (2.5.4) dengan M_n maka :

$$\ddot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{P_n(t)}{M_n} \tag{2.5.5}$$

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Persamaan ini adalah suatu persamaan diferensial orde dua yang menerangkan kontribusi modal ke-n. Dimana apabila kesemua modal yang diinginkan dibentuk menjadi suatu persamaan matriks besar, maka persamaannya adalah sebagai berikut :

$$M\ddot{q} + Kq = P_n(t)$$

Persamaan matriks menjadi *uncoupled* karena matriks M dan K adalah matriks diagonal, dimana tiap modal-n dapat diselesaikan seperti permasalahan SDOF, dimana hanya $q_n(t)$ sebagai komponen yang tidak diketahui. Kemudian untuk mengetahui vektor perpindahan, setelah mengetahui nilai q (vektor $q_n(t)$), kita kembali ke pers. (2.5.2).

2.5.2. Analisa Modal Untuk Sistem Dengan Redaman

Dengan memasukkan faktor redaman pada pers. (2.5.1), maka persamaan geraknya menjadi

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t)$$

Metode yang digunakan dalam penurunan persamaan sama dengan bagian sebelumnya. Sehingga pada akhirnya akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$M_n\ddot{q}_n(t) + \sum_{r=1}^{N} C_{nr}\dot{q}_r(t) + K_n q_n(t) = P_n(t) \qquad (2.5.6)$$

Dimana

$C_{nr} = \varphi_n^T c \varphi_r$

Pers. (2.5.6) dalam bentuk matriks :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = P(t)$$

C adalah matriks non-diagonal dari koefisien C_{nr}, sehingga nilai $q_n(t)$ masih *coupled*. Persamaan modal dapat bersifat *uncoupled* apabila sistem struktur memiliki tipe redaman klasik, dimana $C_{nr} = 0$ apabila $n \neq r$. Sehingga persamaan (2.5.5) menjadi

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

$$M_n\ddot{q}_n(t)+C_n\dot{q}_n(t)+K_nq_n(t)=P_n(t) \tag{2.5.7}$$

Dengan membagi pers. (2.5.6) dengan M_n maka :

$$\ddot{q}_n+2\zeta_n\omega_n\dot{q}_n+\omega_n^2q_n=\frac{P_n(t)}{M_n} \tag{2.5.8}$$

2.5.3. Ekspansi Modal Untuk Vektor p(t) = sp(t)

Kita akan menganggap kasus pembebanan dimana gaya yang diberikan *pj(t)* memiliki variasi waktu yang sama *p(t)*, dan distribusi spatial gaya tersebut didefinisikan s, independen terhadap waktu. Jadi :

$$p(t)=sp(t) \tag{2.5.9}$$

Dengan mengekspansi distribusi spasial vektor s dari gaya yang bekerja sebagai :

$$s=\sum_{r=1}^{N}s_r=\sum_{r=1}^{N}\Gamma_r m\phi_r \tag{2.5.10}$$

Dengan mengalikan kedua sisi ruas pers. (2.5.10) dengan ϕ_n^T dan memanfaatkan ortogonalitas properti mode memberikan :

$$\Gamma_n=\frac{\phi_n^Ts}{M_n} \tag{2.5.11}$$

Kontribusi dari mode ke-n akibat eksitasi vektor s adalah :

$$s_n=\Gamma_n m\phi_n \tag{2.5.12}$$

Pengembangan dari pers. (2.5.10) memiliki properti yang penting pada respon dinamik mode ke-n akibat vektor gaya $s_n p(t)$. Properti ini menjadi jelas dengan memeriksa gaya tergeneralisasi untuk mode ke-n yang berkaitan dengan vektor gaya total :

$$P_n(t)=\phi_n^Tsp(t)$$

Dengan mensubstitusi nilai s pada pers. (2.5.10) memberikan :

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

$$P_n(t) = \sum_{r=1}^{N} \Gamma_r \left(\phi_n^T m \phi_r \right) p(t)$$

Dengan memanfaatkan sifat ortogonalitas, direduksi menjadi :

$$P_n(t) = \Gamma_n M_n p(t) \tag{2.5.13}$$

2.5.4. Analisa Modal Untuk p(t) = sp(t)

Persamaan dinamik dari sautu sistem MDF akibat gaya $p(t) = sp(t)$ adalah :

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \Gamma_n p(t) \tag{2.5.14}$$

Faktor Γ_n yang mengalikan gaya $p(t)$ seringkali disebut *modal participation factor*.

Solusi dari modal koordinat $q_n(t)$ adalah :

$$q_n(t) = \Gamma_n D_n(t) \tag{2.5.15}$$

Dimana $D_n(t)$ ditentukan dari :

$$\ddot{D}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{D}_n + \omega_n^2 D_n = p(t) \tag{2.5.16}$$

Kemudian kontribusi dari mode ke-n untuk perpindahan nodal $u(t)$ adalah :

$$u_n(t) = \Gamma_n \phi_n D_n(t) \tag{2.5.17}$$

2.5.5. Jumlah Moda Yang Dibutuhkan Dalam Analisa Modal

Setiap moda pada suatu analisa dinamik memiliki kontribusi. Dari berbagai literatur yang ada telah dijelaskan bahwa moda-moda awal relatif memiliki andil yang besar terhadap hasil analisa yang dilakukan (i.e. respon dinamik), namun tentunya moda-moda lainnya tidak dapat diabaikan, hal yang dapat kita lakukan adalah menentukan seberapa banyak jumlah moda yang akan kita ambil untuk dianalisa.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Sebelum membahas langsung ke jumlah moda yang dibutuhkan, kita kembali mengulang mengenai faktor kontribusi dari modal. Karena faktor kontribusi inilah yang akan menjadi dasar perhitungan jumlah moda yang dibutuhkan.

Anil K. Chopra telah membahas bahwa kontribusi dari suatu moda ke-n terhadap suatu respon r dapat diekspresikan sebagai berikut

$$r_n(t) = r^{st}\overline{r}_n\left[\omega_n^2 D_n(t)\right] \tag{2.5.18}$$

Dimana $r_n(t)$ adalah respon dari mode ke-n, r^{st} respon statis dari r, $D_n = \frac{q_n(t)}{\Gamma_n}, \Gamma_n = \frac{\varphi_n^T s}{M_n}, s = \sum_{r=1}^{N} s_r = \sum_{r=1}^{N} \Gamma_r m\varphi_r$, s adalah distribusi spasial dari suatu respon atau eksitasi, Γ_n adalah faktor partisipasi modal, dan $\overline{r_n}$ adalah faktor kontribusi moda yang direpresentasikan oleh persamaan berikut :

$$\overline{r}_n = \frac{r_n^{st}}{r^{st}} \tag{2.5.19}$$

r_n^{st} adalah respon statik dari mode ke-n.

Faktor kontribusi moda memiliki tiga properti yang penting. Pertama faktor ini tidak memiliki dimensi sehingga bersifat universal. Kedua faktor ini tidak bergantung terhadap bagaimana proses normalisasi moda-moda dan properti modal tidak masuk dalam r^{st}. Yang ketiga, jumlah dari keseluruhan faktor kontribusi moda adalah 1.

$$\sum_{n=1}^{N} \overline{r}_n = 1$$

Properti terakhir dari faktor kontribusi moda ini berpengaruh terhadap penentuan jumlah yang dibutuhkan. Jumlah moda yang dapat diambil adalah tak terhingga. Semakin banyak moda yang diambil, hasil analisa dinamik suatu sistem struktur akan lebih baik (mendekati nilai eksak). Namun, dengan jumlah moda dapat dikurangi tanpa mengurangi aspek keakurasian hasil analisa yang

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

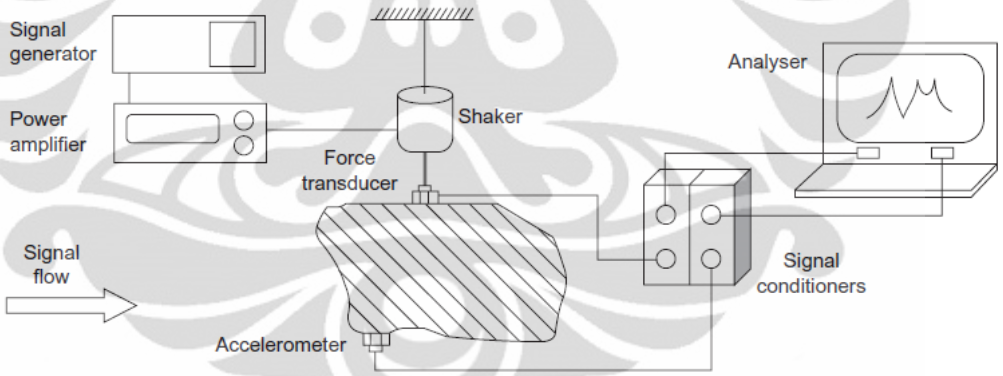
diharapkan. Cara yang dilakukan adalah dengan menentukan error margin yang diinginkan, sehingga jumlah moda dapat ditentukan. Hal tersebut dijelaskan oleh persamaan berikut :

$$e_j = 1 - \sum_{n=1}^{J} \overline{r}_n \qquad (2.5.20)$$

J adalah moda terakhir yang diambil dan e_j adalah error margin yang ditentukan oleh ahli struktur.

2.6. Tes Vibrasi Dan *Experimental Modal Analysis*

Experimental modal analysis (*EMA*) adalah proses untuk menentukan parameter modal (frekuensi, redaman, dan mode getar) dengan cara pendekatan eksperimental. Secara umum, proses *Experimental modal analysis* dapat dijelaskan oleh gambar di bawah ini.



Gambar 2.15. Mekanisme Tes *Experimental Modal Analysis (EMA)*

Suatu sistem struktur dieksitasi suatu gaya (input) yang menghasilkan respon (output). Input dan output diukur oleh *transducer* atau *accelerometer* yang kemudian sinyalnya diperbesar oleh *amplifier*. Untuk mengukur input dan output biasanya digunakan elemen *strain gauge sensing* ataupun sensor *piezoelectric* merubah respon fisik (deformasi, kecepatan, ataupun percepatan) menjadi sinyal elektrik. Kemudian setelah amplifikasi sinyal, sinyal dianalisa secara otomatis oleh *frequency analyzer*, dan hasil yang didapatkan dianalisa lebih mendalam oleh

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

tenaga ahli dan kemudian disimpan untuk keperluan lebih lanjut. Pengukuran ini terdiri dari tiga mekanisme, yaitu mekanisme eksitasi, mekanisme pengukuran respon data, dan mekanisme akuisisi data dan pengolahan.

2.6.1. Mekanisme Eksitasi

Hal pertama yang dilakukan dalam *Experimental Modal Analysis* (*EMA*) adalah pemilihan eksitasi yang memberikan suatu eksitasi gaya dengan besaran dan frekuensi yang cukup untuk menggetarkan suatu sistem struktur. Ada berbagai macam jenis peralatan eksitasi yang mampu mengeksitasi struktur. Dua jenis eksitasi yang sering digunakan adalah *shaker* dan *hammer*.

Hammer adalah sebuah perangkat yang menghasilkan eksitasi berupa beban pulsa pada struktur. *Hammer* secara keseluruhan terdiri atas ujung palu (hammer tip), *force transducer*, penyeimbang massa dan gagang *hammer*. Untuk mengontrol frekuensi dari gaya eksitasi *hammer* yang diberikan pada struktur adalah dengan memodifikasi jenis material yang digunakan pada ujung (tip) dari hammer. Tipe eksitasi ini mudah untuk diaplikasikan dan sederhana namun bentang frekuensi eksitasi tidak terlalu besar. Selain itu beban yang diberikan oleh hammer mampu merusak bagian struktur yang bersentuhan langsung dengan *hammer*.

Kemudian untuk *shaker* (*electrodynamic shaker* yang sering digunakan pada modal testing), tipe eksitasi ini memiliki rentang frekuensi eksitasi yang cukup besar. Apabila dibutuhkan eksitasi untuk besaran yang besar dan rentang frekuensi eksitasi pendek, maka dianjurkan untuk menggunakan *electrohydraulic exciter*.

2.6.2. Mekanisme Pembacaan

Untuk pembacaan respon struktur ini digunakan *accelerometer* maupun *force transducer*. *Accelerometer* adalah sensor yang paling umum digunakan untuk modal testing yang berfungsi untuk mengukur percepatan pada struktur yang berupa sinyal elektrik. Ada dua aspek dalam pengukuran percepatan yang harus diperhatikan. Pertama adalah frekuensi dan yang kedua adalah amplitudo. Keduanya tercermin dalam hubungan input-output accelerometer. Accelerometer

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

yang ideal harus memiliki hubungan input dan output yang linear untuk memastikan bahwa konten amplitudo pada sinyal percepatan pada frekuensi yang berbeda terekam.

Force transducer adalah jenis lain dari sensor yang digunakan dalam modal testing. Seperti accelerometer, *piezoelectric force transducer* menghasilkan output berupa sinyal elektrik yang proporsional terhadap gaya yang diberikan pada *transducer*. Pada kasus kebanyakan, sinyal elektrik yang dihasilkan *transducer* tidak dapat digunakan untuk pengukuran langsung dan pengolahan. Masalah ini, biasanya berhubungan dengan sinyal yang menjadi lemah sehingga biasanya diselesaikan dengan menggunakan *amplifier*. *Amplifier* dapat berupa *charge amplifier* atau *voltage amplifier*, yang fungsinya untuk mencocokkan dan memperbesar signal dalam hal besaran dan fase di atas range frekuensi yang dibutuhkan.

2.6.3. Mekanisme Akuisisi Data Dan Pengolahan

Mekanisme akuisisi data dan pengolahan mengukur sinyal yang terbaca dari *transducer* dan memastikan besaran dan fase dari eksitasi dan respon. Analisa digunakan untuk menggali dan memperoleh parameter modal (periode getar, rasio redaman, dan mode getar) dari struktur. Analisa yang paling umum dilakukan adalah berdasarkan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) dan menghasilkan pengukuran langsung dari *Frequency Response Function* (FRF). Keduanya disebut sebagai *spectrum analyzers* atau FFT analyzers. Pada dasarnya *analyzer* menerima sinyal voltasi analog yang merepresentasikan percepatan (gaya, kecepatan, *displacement*, atau regangan) dari *signal conditioning amplifier*. Sinyal ini disaring dan digitalisasi untuk perhitungan. Frekuensi spectra yang memiliki ciri tersendiri dari sinyal individu dan cross-spectra antara input dan bermacam-macam output yang dihitung. Analisa sinyal kemudian dapat dimanipulasi dengan berbagai macam cara untuk menghasilkan frekuensi alami, mode getar, dan rasio redaman dalam hasil numerik atau dalam bentuk grafis. Terdapat dua prosedur analisa yang digunakan, *time domain* dan *frequency domain*. Metode *time domain* menghasilkan parameter modal langsung dari rekaman respon dalam domain

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

waktu. Metode *frequency domain* menyelesaikan hal yang sama dengan mengkonversi sinyal respon ke dalam domain frekuensi.

Identifikasi modal dapat dilakukan *berdasarkan tiga tipe test, yaitu: (1) ambient vibration test; (2) free vibration test;* dan *(3) forced vibration test.*

2.6.4. *Ambient Vibration Test*

Struktur teknik sipil seperti gedung selalu bergetar akibat angin, getaran kecil pada tanah (*microtremors, microsism*), eksitasi yang disebabkan oleh kegiatan manusia, dll. Getaran kecil (*ambient vibration*) pada tanah biasanya disebabkan oleh aktifitas manusia (lalu lintas, industri, dll) pada frekuensi > 1 Hz. Getaran pada tanah disebabkan oleh hal-hal diatas dapat diklasifikasikan sebagai *white noise input* (sinyal acak) yang berada pada rentangan frekuensi dari gedung-gedung pada biasanya yaitu kira-kira antara 1-10 Hz.

Dari sini dapat kita simpulkan bahwa gaya yang diberikan pada struktur untuk bergetar tidak diketahui secara pasti, sehingga analisa properti modal dilakukan dengan hanya menggunakan hasil pengukuran respon getaran dilokasi dimana *accelerometer* diletakkan (*output-only modal identification*). Selain itu, dikarenakan getaran yang terjadi memiliki amplitudo yang kecil, maka getaran yang disebabkan oleh tipe eksitasi ini dapat menjelaskan perilaku getaran linear dari struktur dan tentunya memenuhi asumsi awal untuk poses penentuan lokasi dan besar kerusakan struktur dengan menggunakan properti modal. Kemudian perlu diperhatikan bahwa getaran yang kecil akan menghasilkan respon yang kecil juga, sehingga untuk metode ini diperlukan sensor yang cukup sensitif.

Dalam pengukuran, pengukuran dilakukan selama satu rentang waktu dan peletakan sensor harus disesuaikan dengan kebutuhan (untuk mengetahui pergerakan translasi dan torsi). Dari beberapa penilitian yang dilakukan, diperlukan puluhan sensor untuk mendapatkan hasil yang baik. Dan juga perlu diperhatikan, untuk setiap pengukuran diletakkan beberapa sensor acuan atau referensi, dikarenakan *ambient excitation vibration* ini disebabkan oleh gaya tidak diketahui secara pasti.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

2.6.5. *Free Vibration Test*

Free vibration muncul pada sistem yang fleksibel saat sistem bergerak dari posisi awal. Tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem saat struktur bergetar. Free vibration dapat diinduksi dengan impacting. Pada struktur, energi terdisipasi akibat gesekan atau panas yang menyebabkan *free vibration decay*. Karakteristik getaran bebas struktur dapat dianalisa untuk menentukan property struktur. *Free vibration testing* merupakan metode tes dinamik *output-only data*. Keutnungan dari tipe tes dinamik ini adalah murah karena tidak membutuhkan peralatan untuk mengeksitasi struktur.

2.6.6. *Forced Vibration Test*

Tipe eksitasi lainnya adalah *forced excitation vibration*. Dimana gaya artifisial tertentu digunakan digunakan untuk mengeksitasi getaran pada struktur sehingga properti modal dari struktur tersebut dapat diketahui. Kata "artifisial tertentu" disini memiliki artian bahwa gaya luar yang diberikan kepada struktur untuk bergetar adalah gaya yang besarnya telah ditentukan pada titik tertentu pada struktur, yang kemudian responnya diukur oleh alat pengukur seperti *accelerometer*. Lalu kemudian FRF yang merupakan hubungan antara gaya eksitasi atau pembebanan dengan respon struktur akan memberikan data properti modal yang kita butuhkan dengan berbagai macam metode analisa, salah satunya yang telah dijelaskan diatas.

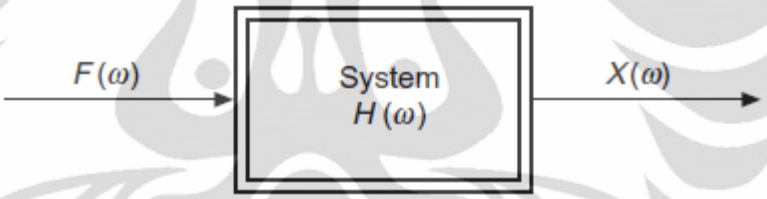
Metode ini umumnya menggunakan *shakers* dan *impact hammers* untuk mengeksitasi sistem. *Mass shaker* dapat digunakan untuk eksitasi vertikal dan horizontal dan dapat digunakan untuk berbagai macam tipe eksitasi. *Mass shaker* dapat menghasilkan dan mempertahankan gaya sinusoidal pada kondisi *steady state*, atau bentuk gelombang lain yang mengkombinasi gelombang *steady state* atau *transient*. *Impact hammer* digunakan dalam *impact testing* untuk mengeksitasi struktur. Berat dari hammer dapat disesuaikan untuk menghasilkan level gaya yang berbeda ke struktur. *Hammer* ini dapat dipegang tangan, digantung rantai, atau dijatuhkan. Keuntungan menggunakan *impact hammer* adalah cepat dan tes dapat dilakukan berulang kali. Ada beberapa keuntungan menggunakan *force vibration test*. Tes ini dapat didesain tipe, lokasi, amplitudo,

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

frekuensi konten, durasi dari gaya dan waktu pada saat gaya diberikan pada struktur (Ishakov dan Ribakov 2005). Dengan memanfaatkan fungsi gaya yang diketahui, banyak ketidakpastian dalam pengumpulan data dan pengolahan dapat dihindari. Walaupun eksitasi seperti *shaker* dan beban jatuh dan korelasi input-output pengukuran tersedia, metode tes, kompleksitas struktur, dan kuantitas data yang diperlukan menghambat metode ini digunakan dalam aplikasi di lapangan. Input atau level eksitasi dari struktur yang besar pada kondisi operasionalnya tidak mudah untuk dikuantifikasikan, yang membuat eksitasi sulit untuk dikontrol.

2.6.7. *Frequency Respon Function*

Frequency Response Function (FRF) adalah pengukuran dasar yang memisahkan parameter dinamik dari suatu struktur. Untuk pengukuran yang ideal, FRF dapat didefinisikan sebagai rasio dari dua transformasi Fourier.



Gambar 2.16. Sistem dengan Input Tunggal dan Output Tunggal

Transformasi Fourier yang pertama merupakan respon *displacement* yang dinotasikan sebagai $X(\omega)$ dan yang kedua merupakan input gaya yang dinotasikan sebagai $F(\omega)$, dimana

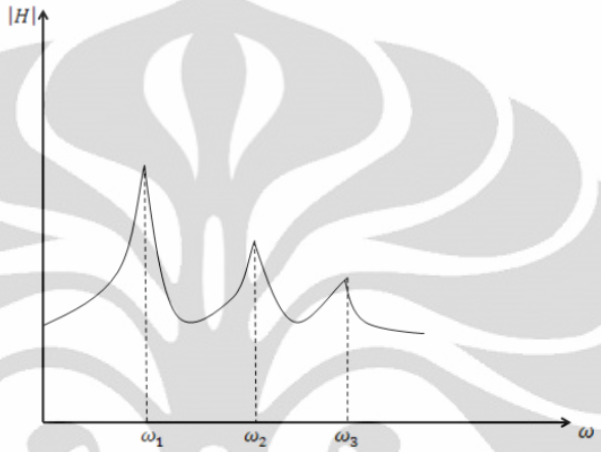
$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \tag{2.5.11}$$

Parameter dinamik (frekuensi alami, rasio redaman, dan mode getar) juga didapat dari pengukuran FRF. FRF mendeskripsikan hubungan input-output antara dua titik pada struktur sebagai fungsi dari frekuensi.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

1. Frekuensi Natural

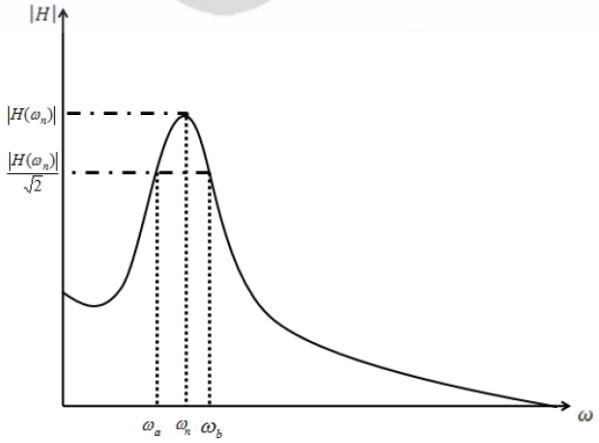
Frekuensi natural dapat ditentukan secara langsung dari kurva FRF, dengan mengacu pada nilai puncak. Nilai puncak pertama diasosiasikan dengan frekuensi natural moda pertama dan seterusnya. Tetapi cara ini tidak akurat apabila struktur yang ditinjau memiliki nilai frekuensi natural yang berdekatan atau memiliki nilai frekuensi natural yang berulang.



Gambar 2.17. Hubungan Nilai FRF dengan Frekuensi Natural

2. Redaman

Cara termudah untuk mendapatkan nilai rasio redam tiap moda dengan menggunakan hasil pengukuran (FRF) adalah dengan menggunakan metode SDOF. Dimana tiap rasio redam per-moda didapatkan dari analisa individu per-moda dari kurva FRF. Untuk lebih jelas lihat gambar dibawah ini dimana dianalisa secara individual moda ke-n:



Gambar 2.18. Analisa Individual Per-Moda dengan FRF

Untuk sistem teredam ringan, rasio redam untuk moda ke-n ζ_n berhubungan dengan frekuensi natural pada moda tersebut dan frekuensi-frekuensi yang berada diantaranya. Hal ini direpresentasikan oleh persamaan berikut :

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_n}$$

Dimana :

$$\left|H(\omega_a)\right| = \left|H(\omega_b)\right| = \frac{\left|H(\omega_n)\right|}{\sqrt{2}} \qquad (2.5.12)$$

3. Mode Getar

Menentukan mode getar dari hasil pengukuran sedikit lebih kompleks dibandingkan dengan properti modal lainnya dan membutuhkan beberapa fungsi transfer (FRF yang menghubungkan antara input gaya pada satu titik dan output respon pada titik lainnya). Dengan asumsi tipe redaman proporsional dan kondisi *underdamped*. Ketika frekuensi eksitasi mendekati atau sama dengan besar frekuensi natural (asumsi data frekuensi natural dan rasio redaman telah diketahui), maka persamaan tersebut menjadi untuk moda ke-n :

$$\left|\varphi_{pn}\varphi_{in}\right| = \left|2\zeta_n\omega_n^2\right|\left|H_{pi}(\omega_n)\right| \qquad (2.5.13)$$

Dengan persamaan diatas kita mampu meng-ekstrak moda getar untuk tiap moda. Namun persamaan diatas hanya mendeskripsikan perubahan gerak suatu elemen saja, sehingga untuk mendapatkan moda getar yang akurat diperlukan banyak pengukuran (pada beberapa titik).

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Gambaran Umum

Pada penelitian ini, struktur yang akan dicari parameter dinamiknya adalah gedung Engineering Center yang terletak di Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Bangunan ini terdiri dari dua bagian yaitu bagian utara dan bagian selatan, dimana penilitian akan difokuskan pada gedung Engineering Center bagian utara. Pada gedung ini akan dicari parameter dinamik, yaitu periode getar dan mode getar secara teoritis dengan melakukan pemodelan. Kemudian parameter dinamik hasil pemodelan akan dibandingkan dengan hasil eksperimen dengan melakukan tes vibrasi (*free vibration test*) pada gedung Engineering Center.

Penelitian pertama kali dilakukan dengan melakukan pemodelan struktur untuk memperoleh parameter dinamik (periode getar dan mode getar) secara teoritis. Mode getar hasil pemodelan ini nantinya akan digunakan untuk menentukan lokasi instalasi *microtremor* yang digunakan untuk mengukur respon *acceleration* struktur. Struktur gedung Engineering Center dimodelkan dengan menggunakan program ETABS 9.5.

Sedangkan untuk memperoleh parameter dinamik secara eksperimen dilakukan dengan tes vibrasi dengan jenis *free vibration test*. Beban yang digunakan untuk mengeksitasi struktur berupa pukulan *hammer* pada kolom gedung serta lompatan. Respon struktur gedung ini kemudian dicatat dengan menggunakan *microtremor* yang ditempatkan pada berbagai tempat di bagian atap gedung. Data respon berupa percepatan ini kemudian dianalisa untuk mendapatkan parameter dinamik struktur (periode getar dan rasio redaman) dengan menggunakan program Geopsy.

Parameter dinamik yang didapatkan dari hasil modelisasi (teoritis) dan tes vibrasi (eksperimen) kemudian dibandingkan dan dianalisa.

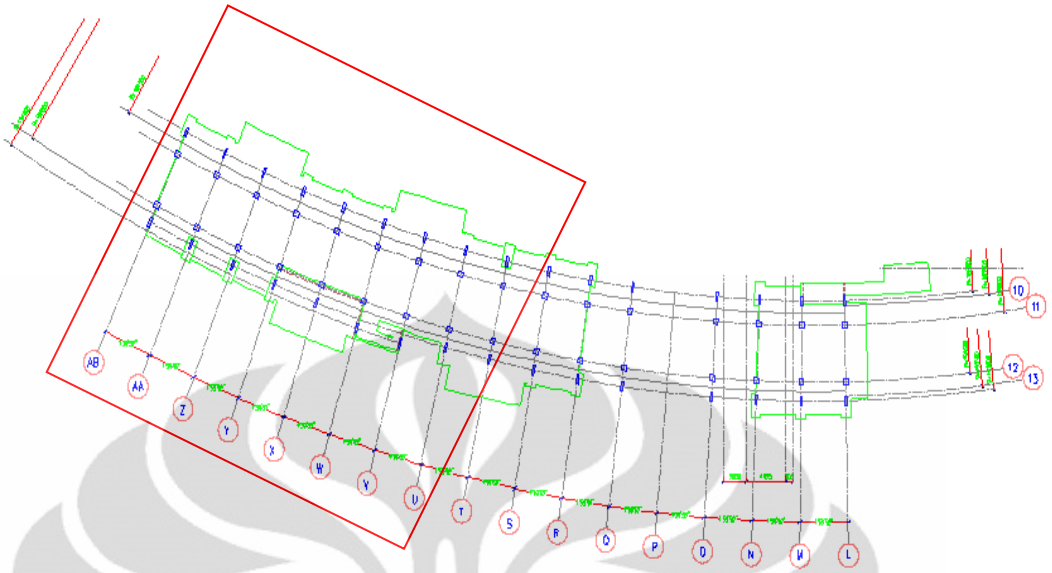
Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

3.2. Simulasi/Pemodelan

3.2.1. Penentuan Data Geometri Struktur

Hal pertama yang harus dilakukan adalah mengetahui data geometri struktur gedung Engineering Center. Gedung Engineering Center merupakan bangunan berbentuk busur yang terdiri dari dua bagian, yaitu bagian utara dan bagian selatan. Gedung Engineering Center bagian utara terdiri dari dua struktur yang terpisah karena terdapat dilatasi sebesar 20 cm diantara as S dan T. Pada penilitian ini dikhususkan pada bangunan utara bagian timur (bagian yang lebih dekat dengan jembatan Teksas). Lantai satu dan lantai dua gedung ini difungsikan sebagai ruang kuliah, sedangkan lantai tiga difungsikan sebagai ruang kuliah dan ruang penelitian. Data geometri dari gedung Engineering Center adalah sebagai berikut :

- Jumlah lantai = 3 lantai
- Elevasi lantai dasar = 5 m
- Elevasi lantai 1 = 3,8 m
- Elevasi lantai 2 = 3,8 m
- Tebal pelat beton = 15 cm
- Tipe kolom = 100 x 30 cm dan 60 x 60 cm
- Tipe balok = 50 x 25 cm dan 60 x 40 cm
- Mutu beton (f_c') = 30 MPa



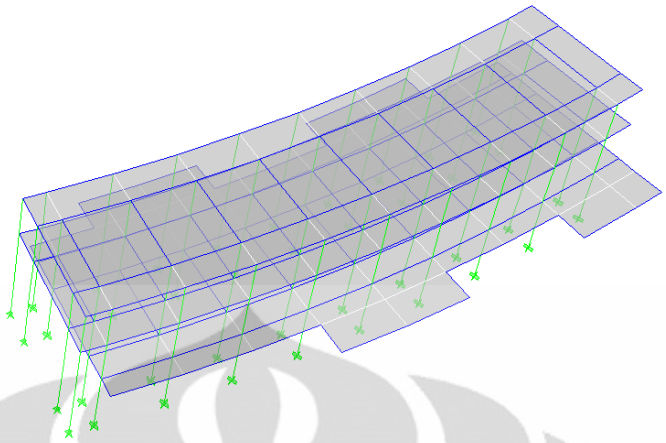
Gambar 3.1. Denah Gedung Engineering Center Bagian Utara

3.2.2. Pemodelan Struktur

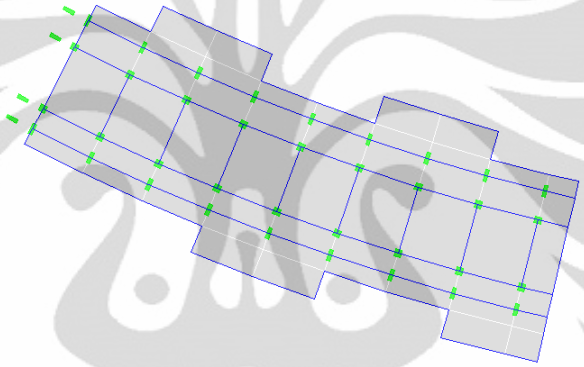
Struktur gedung Engineering Center dimodelkan dengan menggunakan program ETABS 9.5.

Gambar 3.2. Gedung Engineering Center

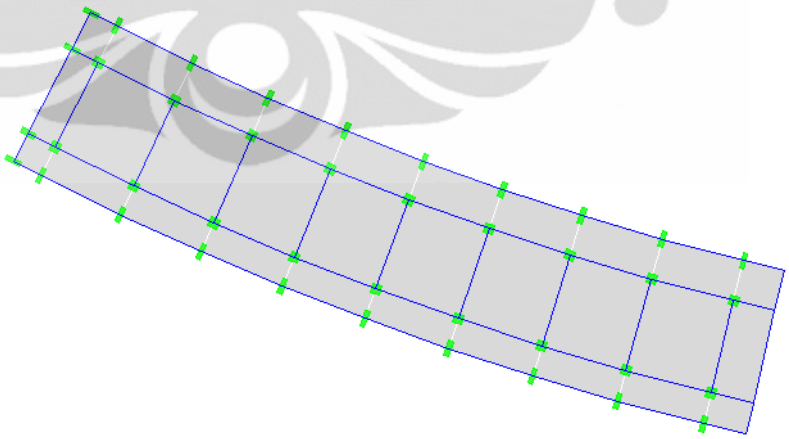
Struktur dimodelisasi sebagai portal ruang tiga dimensi dengan 6 derajat kebebasan (*degree of freedom/DOF)* pada tiap nodal (3 DOF translasi dan 3 DOF rotasi). Pelat lantai di modelisasi dengan elemen *shell* dan pondasi dimodelkan sebagai perletakan jepit.



Gambar 3.3. Tampak 3D Gedung Engineering Center



Gambar 3.4. Denah Struktur Lantai Dasar Gedung Engineering Center



Gambar 3.5. Denah Struktur Lantai 1 dan 2 Gedung Engineering Center

3.2.3. Analisa Modal

Setelah dilakukan pemodelan, maka selanjutnya adalah dilakukan analisa modal. Dari hasil program ETABS ini akan diperoleh respon struktur berupa periode getar dan rasio redaman struktur. Dikarenakan hanya diperlukan analisa modal, maka tidak perlu dilakukan analisa pembebanan terhadap model struktur. Beban yang bekerja pada struktur hanya berasal dari berat sendiri struktur.

3.3. Eksperimen

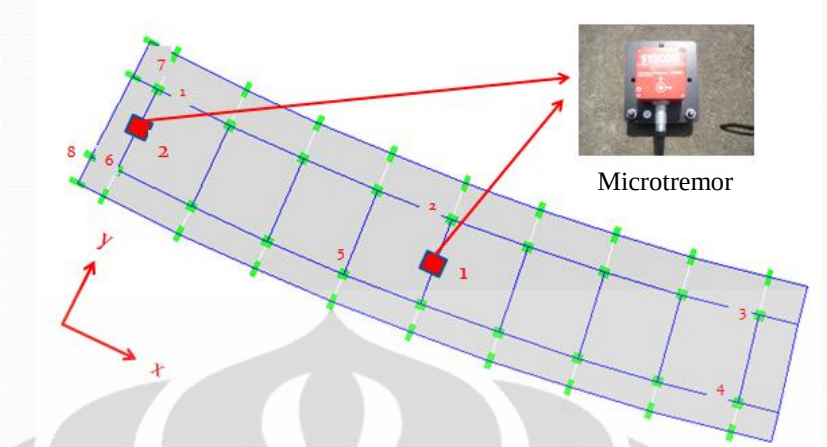
3.3.1. Penentuan Lokasi Beban Dan *Microtremor*

Pada penelitian ini, jenis tes vibrasi yang digunakan adalah *free vibration test*. Beban yang diberikan untuk mengeksitasi struktur agar bergetar bebas adalah berupa eksitasi pukulan *hammer* pada kolom di bagian atap gedung dan beban lompatan. Beban *hammer* ini diberikan pada arah x, y, dan z bangunan. Arah x merupakan arah longitudinal bangunan (arah timur-barat), arah y merupakan arah transversal bangunan (arah utara-selatan), dan arah z merupakan arah tegak lurus lantai bangunan.

Untuk mencatat respon struktur ini, ditempatkan *microtremor* di atap gedung. Penentuan lokasi *microtremor* akan ditentukan dari hasil mode getar yang telah diperoleh sebelumnya dari hasil pemodelan dimana *microtremor* akan diletakkan pada bagian tengah bentang (posisi 1) dan ujung bentang (posisi 2). Untuk *microtemor* di posisi 1, respon percepatan yang dicatat adalah berupa respon struktur tanpa eksitasi, dan pukulan *hammer* arah x,y, dan z. Kolom yang diberikan eksitasi *hammer* ditandai dengan nomor 1 sampai dengan nomor 6. Sedangkan untuk *microtremor* di posisi 2, eksitasi yang diberikan adalah pukulan *hammer* arah x dan y pada kolom no 7 dan 8, pukulan *hamme*r pada pelat atap dekat dengan lokasi *microtremor*, serta eksitasi lompatan dekat dengan posisi *microtremor*.

Tabel 3.1. Jenis Eksitasi yang Diberikan pada Struktur

No	Jenis Eksitasi	Lokasi Microtremor
1	Tanpa eksitasi	Tengah bentang
2	Pukulan Hammer (arah x,y,z)	Tengan bentang dan ujung bentang
3	Lompatan	Ujung bentang

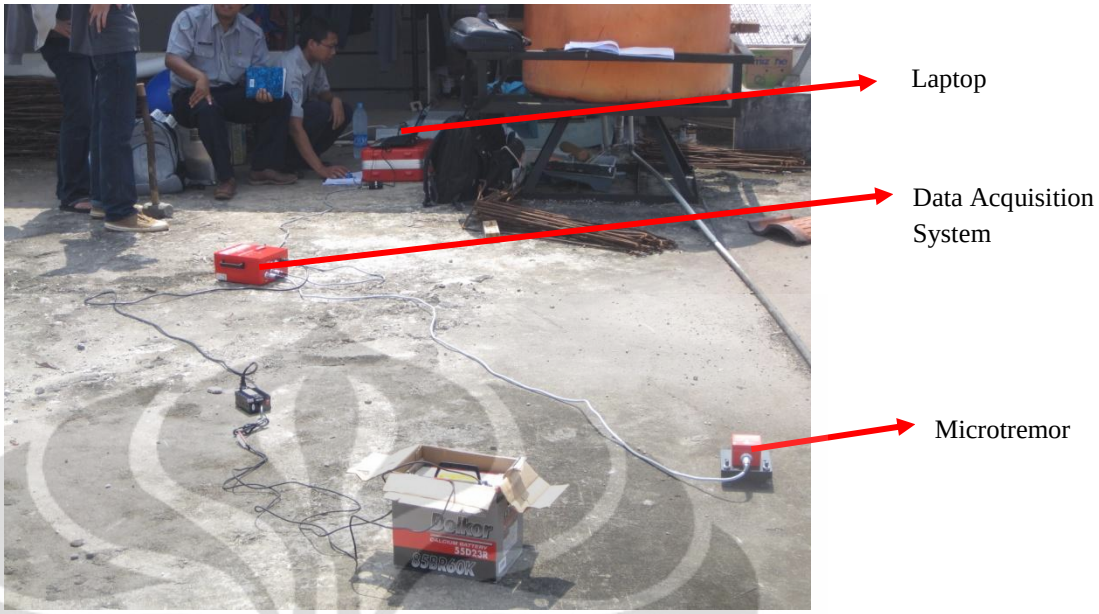


Gambar 3.6. Lokasi Pemberian Eksitasi dan Penempatan *Microtremor*

3.3.2. Instalasi

Pada saat instalasi, microtremor dengan *sensor accelerometer* dihubungkan dengan *data acquisition system* dan disinkronisasi ke laptop. *Microtremor* berfungsi untuk mengkonversi getaran mekanis struktur ke sinyal elektrik dan kemudian sinyal elektrik tersebut didigitalisi menjadi grafik respon perepatan struktur. Range frekuensi yang dapat dicatat oleh *microtremor* ini mulai dari DC (0 Hz) sampai dengan 1000 Hz. Hasil digitalisasi ini dapat dilihat pada laptop yang telah terhubung dengan *microtremor*.

Gambar 3.7. *Microtremor* dan *Data Acquisition System*



Gambar 3.8. Microtremor dengan Sensor *Acceleration, Data Acquisition System*, dan Laptop

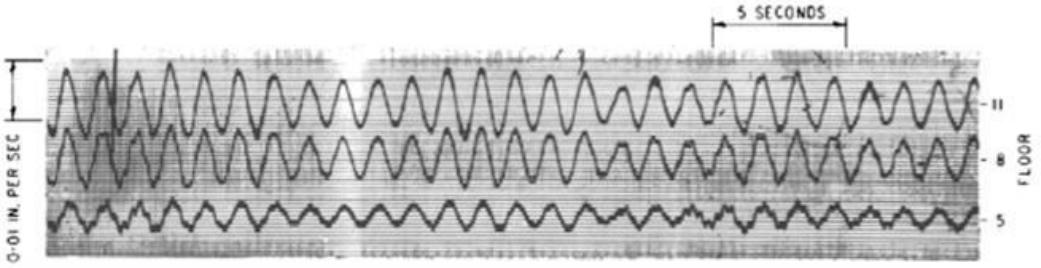
3.3.3. Tes Vibrasi

Agar struktur bergetar, maka struktur diberikan berbagai macam eksitasi yaitu berupa pukulan *hammer* dan lompatan. Kemudian respon getaran bebas struktur akibat eksitasi awal dicatat oleh *microtremor*. Respon struktur yang dicatat adalah berupa respon percepatan. *Microtremor* ini dapat mencatat respon percepatan dalam tiga arah, yaitu arah x, y, dan z sehingga untuk tiap eksitasi yang diberikan akan dihasilkan tiga respon percepatan pada masing-masing arah. Sedangkan untuk besarnya gaya eksitasi yang diberikan pada struktur, pada penelitian ini tidak perlu diketahui karena fungsi pemberian eksitasi adalah untuk membuat struktur bergetar bebas saja.

3.3.4. Data hasil Pengukuran

Hasil pengukuran yang akan diperoleh adalah berupa respon percepatan struktur terhadap waktu (*time domain*).

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

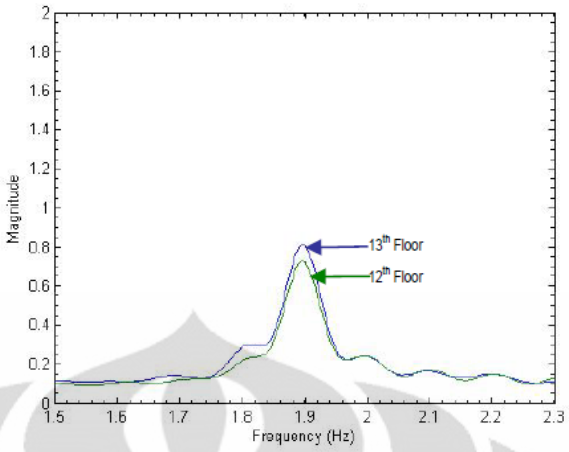


Gambar 3.9. Contoh Hasil Pengukuran Tes Vibrasi (*Time Domain*)

Respon struktur yang diperoleh dari hasil pengukuran akan diubah ke dalam bentuk *frequency domain* dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) dengan bantuan program Geopsy atau yang disebut sebagai *Frequency Response Function* (FRF). Dari FRF selanjutnya akan dapat diperoleh parameter dinamik struktur yaitu periode getar dan rasio redaman. Nilai dari periode getar diperoleh dengan menentukan frekuensi natural struktur terlebih dahulu dimana $T = \frac{1}{f}$. Frekuensi natural struktur dapat langsung ditentukan dengan mengacu pada nilai puncak. Nilai puncak pertama kurva FRF diasosiasikan dengan frekuensi natural mode pertama dan seterusnya.

Untuk memperoleh nilai rasio redaman struktur adalah dengan menggunakan metode ***half power bandwith*** dimana $\zeta = \frac{f_b - f_a}{2 f_n}$. f_n merupakan frekuensi alami struktur mode ke-n dan f_a, f_b merupakan frekuensi struktur dari kedua sisi frekuensi natural dimana amplitudo u_o $1/\sqrt{2}$ kali amplitudo resonansi.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

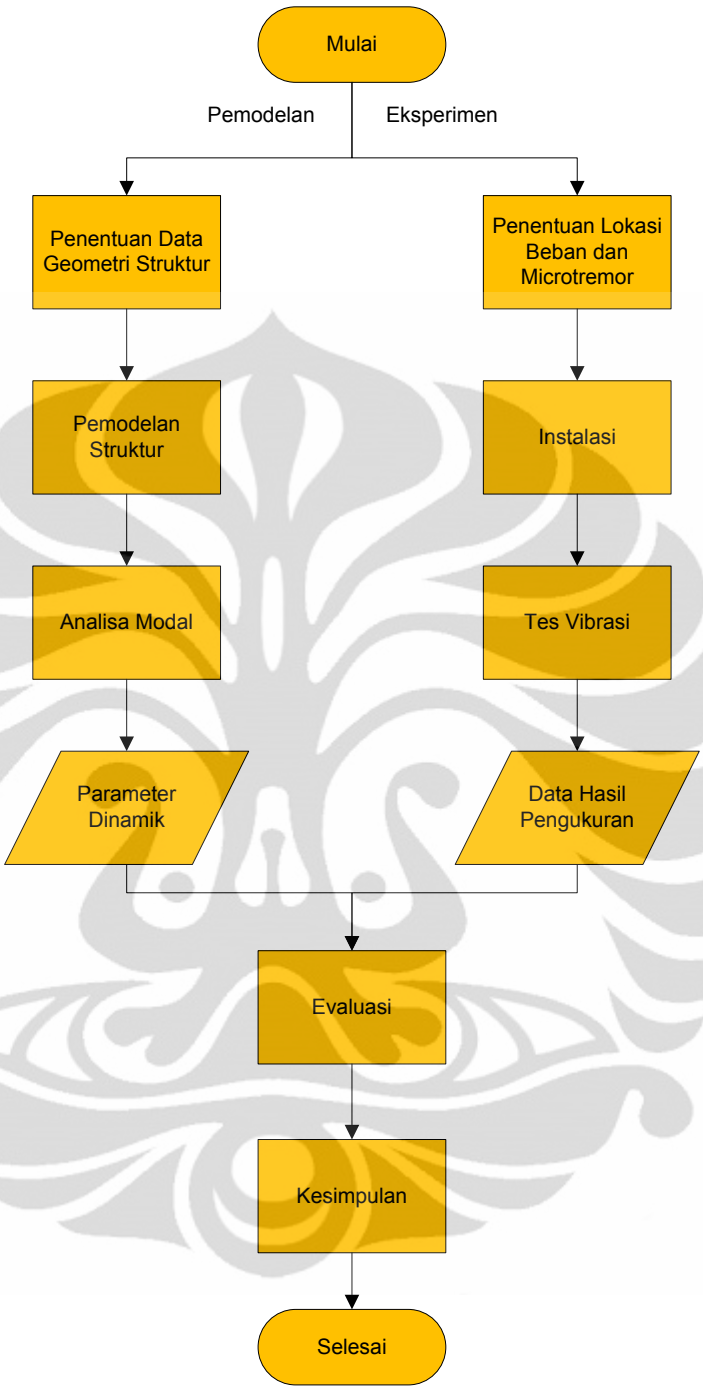


Gambar 3.10. Contoh Hasil Pengukuran Tes Vibrasi (*Frequency Domain*)

3.4. Evaluasi

Setelah mendapat parameter dinamik struktur (periode getar dan rasio redaman) hasil dari pemodelan maupun hasil dari pengukuran vibrasi, selanjutnya akan dibandingkan apakah hasil dari kedua metode tersebut menunjukkan hasil yang identik atau terjadi penyimpangan. Selanjutnya akan ditarik kesimpulan dari hasil penelitian ini.

Secara umum diagram alir penelitian adalah sebagai berikut :



Gambar 3.11. Diagram Alir Penelitian

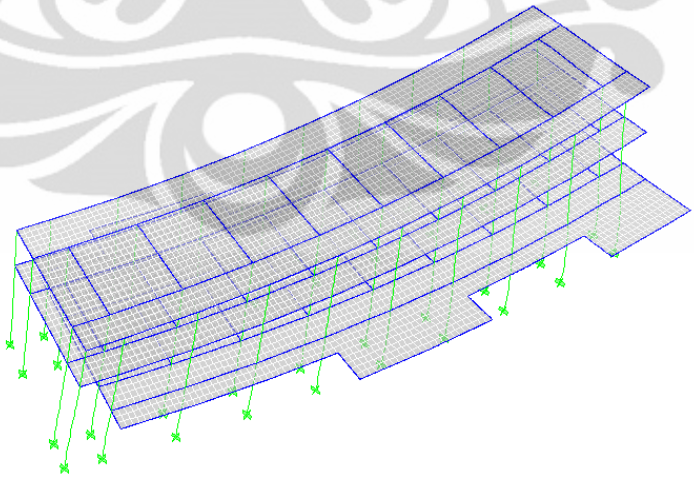
BAB 4
ANALISIS DAN HASIL PENELITIAN

4.1. Hasil Pemodelan

Struktur gedung Engineering Center dimodelkan dengan menggunakan program ETABS 9.5 untuk memperoleh periode getar dan mode getar struktur secara teoritis. Dari hasil analisis ETABS diperoleh periode getar untuk tiga mode pertama memiliki nilai yang berdekatan yaitu sekitar 0,4 s. Untuk mode pertama, struktur mengalami translasi pada arah transversal (arah sumbu y) dengan tambahan pengaruh torsi. Pada mode kedua, struktur mengalami translasi pada arah longitudinalnya (arah sumbu x). Sedangkan pada mode ketiga, struktur mengalami torsi. Pada pembahasan ini hanya mode pertama, mode ketujuh, mode ketiga belas, dan mode kedua puluh delapan yang akan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Untuk periode getar dan mode getar dari empat mode tersebut adalah sebagai berikut :

1. Mode 1

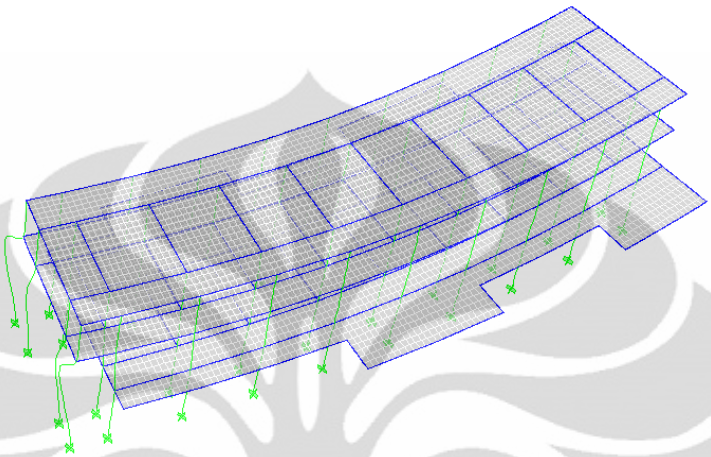
Mode pertama diperoleh periode getar struktur sebesar 0,4484 s dengan mode getar translasi arah Y dengan pengaruh torsi.



Gambar 4.1. Mode Pertama Struktur Gedung Engineering Center

2. Mode 7

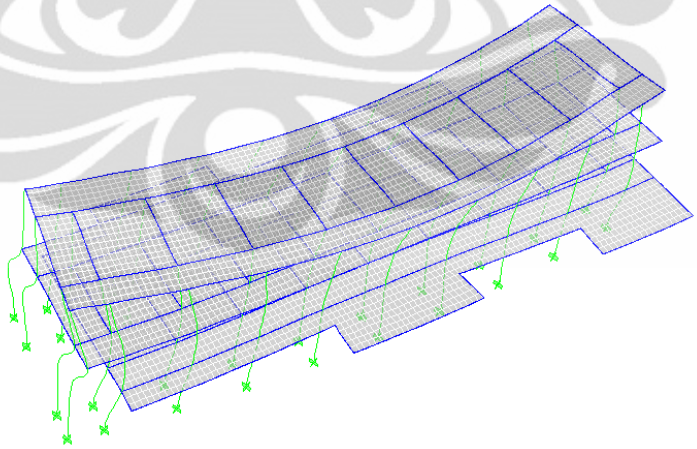
Mode ketujuh diperoleh periode getar struktur sebesar 0,0957 s dengan mode getar torsi.



Gambar 4.2. Mode Ketujuh Struktur Gedung Engineering Center

3. Mode 13

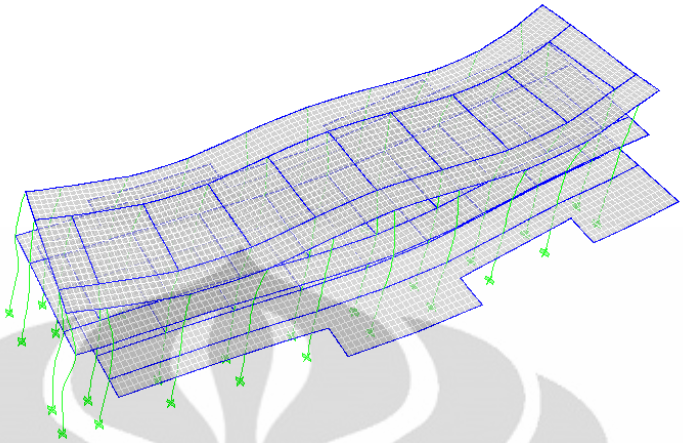
Mode ketiga belas diperoleh periode getar struktur sebesar 0,0674 s.



Gambar 4.3. Mode Ketiga Belas Struktur Gedung Engineering Center

4. Mode 28

Mode kedua puluh delapan diperoleh periode getar struktur sebesar 0,0246 s.



Gambar 4.4. Mode Kedua Puluh Delapan Struktur Gedung Engineering Center

Berikut ini adalah rangkuman untuk dua puluh delapan mode getar pertama struktur gedung Engineering Center beserta partisipasi massanya.

Tabel 4.1. Dua Puluh Delapan Mode Getar Pertama Struktur Gedung Engineering Center

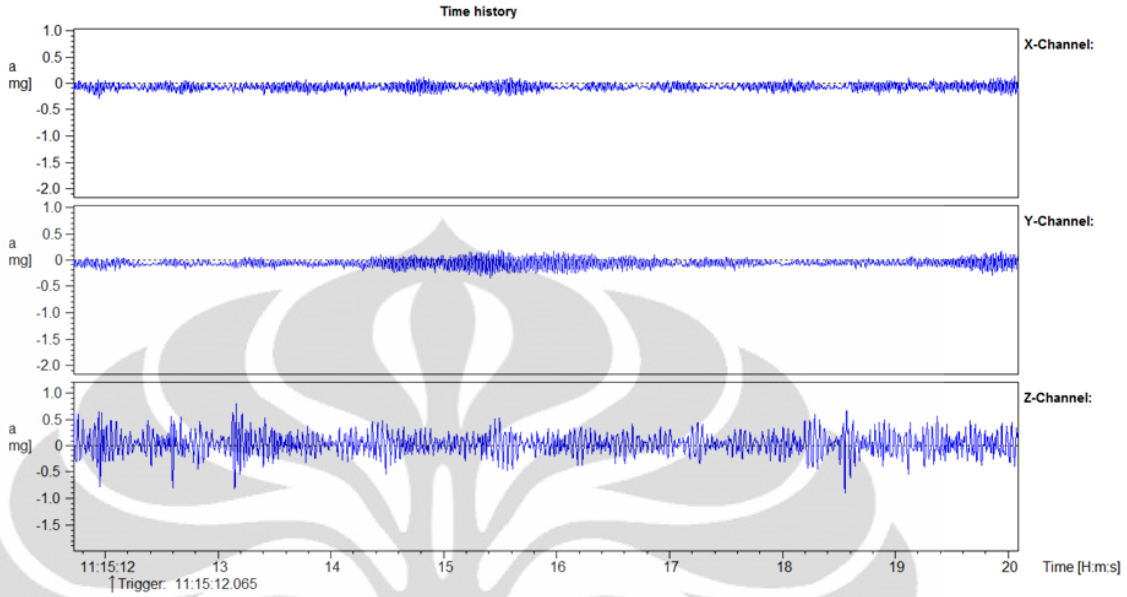
Mode	Periode (s)	UX	UY	UZ
1	0.4484	9.5382	47.3819	0
2	0.4346	81.6808	5.2107	0
3	0.4253	0.3372	33.2613	0
4	0.1377	6.3314	0.5360	0
5	0.1276	0.5768	6.8784	0
6	0.1186	0.8704	5.2143	0
7	0.0957	0.0017	0.0091	0
8	0.0939	0	0	0
9	0.0928	0	0	0
10	0.0916	0	0	0
11	0.0858	0	0.0002	0
12	0.0740	0.2353	0.0167	0
13	0.0674	0.0047	0.0043	0
14	0.0571	0.0187	0.2977	0
15	0.0541	0.2366	1.123	0
16	0.0486	0.0005	0.0013	0
17	0.0415	0.0006	0.0013	0
18	0.0382	0.0381	0.0109	0

19	0.0378	0.003	0.0072	0
20	0.0353	0.0003	0.0032	0
21	0.0345	0.0329	0.0164	0
22	0.0334	0.0036	0.0002	0
23	0.0319	0.0015	0.0002	0
24	0.0317	0.0004	0	0
25	0.0313	0.0008	0	0
26	0.0297	0.0848	0.0243	0
27	0.0263	0	0.0001	0
28	0.0246	0	0.0001	0

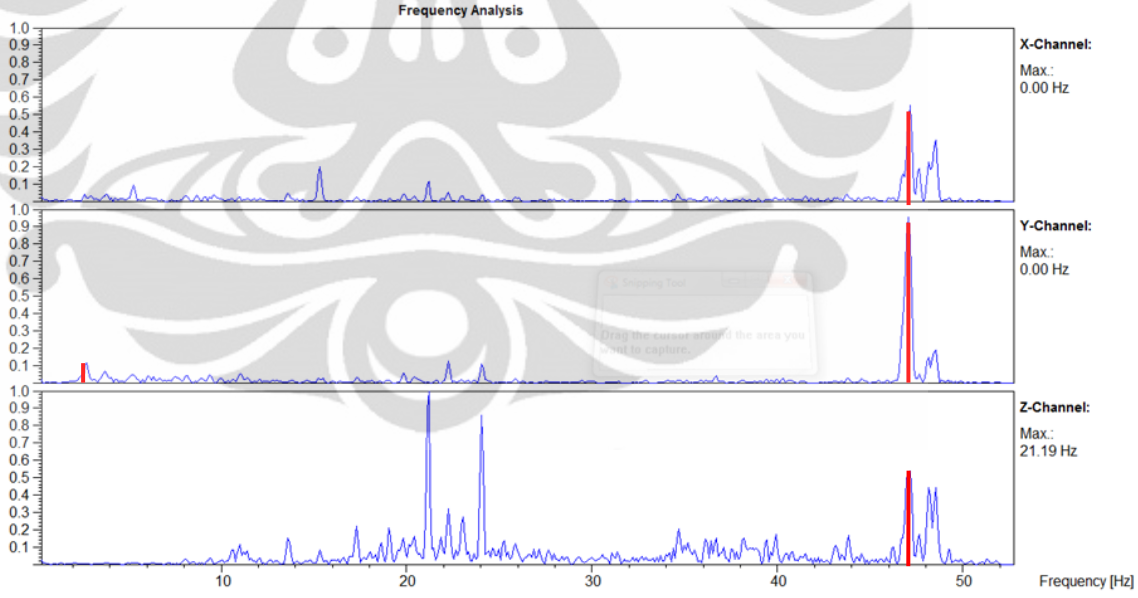
4.2. Hasil Eksperimen

Pada eksperimen ini gedung Engineering Center diberikan berbagai macam eksitasi, yaitu tanpa eksitasi; eksitasi pukulan *hammer* arah x, y, dan z; dan eksitasi berupa lompatan. Arah x merupakan arah longitudinal dari gedung dan arah y merupakan arah transversal gedung. Respon struktur akibat eksitasi ini dicatat oleh instrumen yaitu *microtremor* dengan sensor *acceleration*, *data acquisition system*, dan laptop. *Microtremor* dihubungkan ke *data acquisition system* yang kemudian disinkronisasi ke laptop. Untuk eksitasi berupa pukulan *hammer* terdapat dua kondisi, yaitu kondisi pertama *microtremor* diletakkan di tengah bentang dan kondisi kedua *microtremor* diletakkan di ujung bentang.

4.2.1. Tanpa Eksitasi



Gambar 4.6. *Time History* untuk Kondisi Tanpa Eksitasi



Gambar 4.7. FRF untuk Kondisi Tanpa Eksitasi

Dari grafik FRF ini, frekuensi alami struktur ditandai dengan garis berwarna merah. Dapat dilihat bahwa ketika struktur tidak diberikan eksitasi, terdapat dua mode yang dapat diamati. Untuk mode pertama, berkaitan dengan puncak kurva FRF yang pertama, pada channel y dimana besarnya frekuensi mode

ini adalah 2,654 Hz. Dengan menggunakan hubungan $T = \frac{1}{f}$, maka dapat diperoleh nilai periode getar pada mode pertama yaitu sebesar 0,3767 s. Mode pertama yang diperoleh dari hasil pemodelan memiliki periode getar sebesar 0,4484 s.

Mode yang berikutnya tercatat *microtremor* memiliki frekuensi sebesar 46,974 Hz dengan nilai periode getar pada mode ini yaitu sebesar 0,0213 s. Jika dicocokkan dengan hasil pemodelan maka mode ini mendekati mode getar ke -28 dengan nilai periode getar hasil pemodelan adalah 0,0246 s.

Untuk memperoleh besarnya rasio redaman struktur adalah dengan menggunakan metode *half power bandwidth* dimana :

$$\zeta = \frac{f_b - f_a}{2 f_n} \quad .$$

Dengan f_a dan f_b adalah frekuensi gaya dari kedua sisi frekuensi resonansi dimana amplitudo u_o $1/\sqrt{2}$ kali amplitudo resonansi.

Dengan menggunakan frekuensi mode pertama diperoleh :

$f_n = 2,654 Hz$
$f_a = 2,603 Hz$
$f_b = 2,683 Hz$

Maka $\zeta = \frac{f_b - f_a}{2 f_n} = \frac{2,683 - 2,603}{2x2,654} = 0,0151 = 1,51\ \%$

4.2.2. Eksitasi Berupa Pukulan *Hammer*

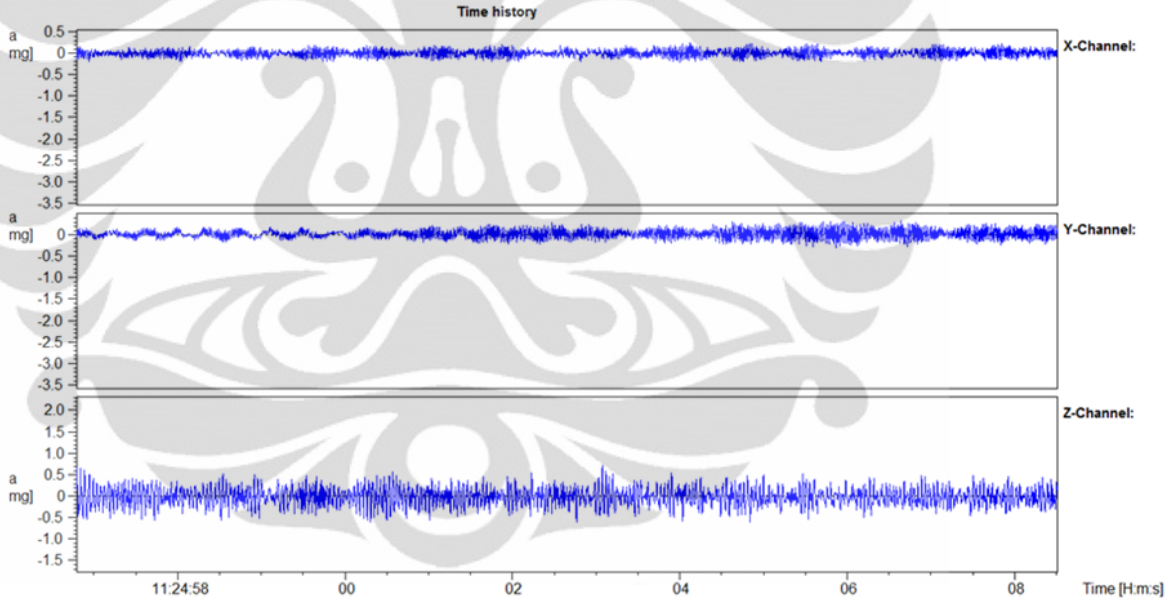
Eksitasi berupa pukulan *hammer* diberikan pada tiga arah, yaitu arah x (timur – barat), arah y (utara – selatan), dan arah z. Pukulan hammer ini diberikan terhadap kolom yang berada di bagian atap gedung. Pada pemberian eksitasi ini, posisi penempatan microtremor berada di tengah bentang (posisi 1) dan di seperempat bentang (posisi 2).

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

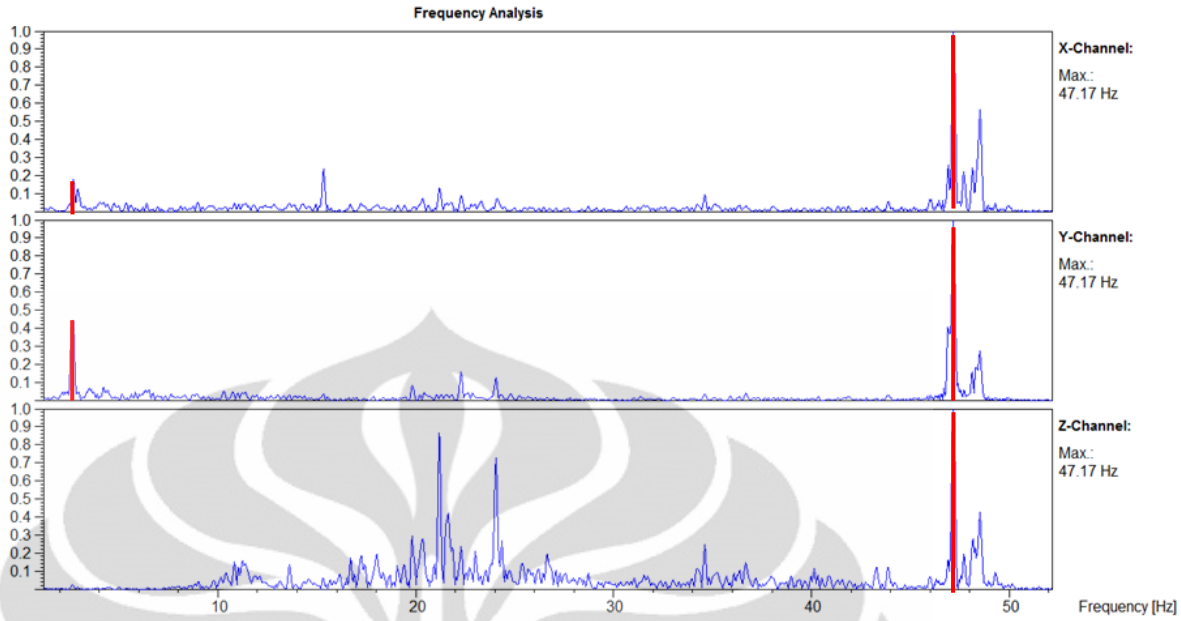
4.2.2.1.Eksitasi Pada Arah X (Timur – Barat)

1. Posisi 1

Gambar 4.8. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 1



Gambar 4.9. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 1



Gambar 4.10. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 1

Untuk pemberian eksitasi pukulan *hammer* ini dapat diperoleh 2 jenis mode. Mode yang pertama memiliki frekuensi sebesar 2,624 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,3811 Hz dimana mode ini merupakan mode pertama struktur. Untuk mode yang kedua diperoleh besarnya frekuensi sebesar 47,171 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0.0212 s. Nilai ini berdekatan dengan mode ke-28 hasil pemodelan (T = 0,0246 s).

Untuk nilai rasio redaman struktur pada eksitasi ini dengan menggunakan frekuensi mode pertama diperoleh :

$f_n = 2,624 Hz$

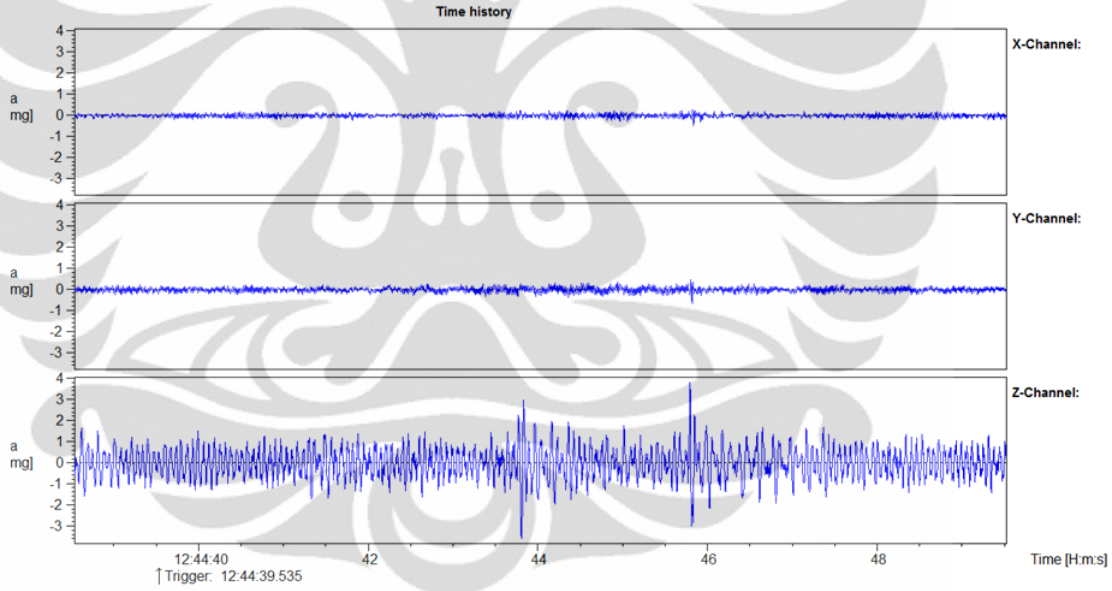
$f_a = 2,616 Hz$

$f_b = 2,668 Hz$

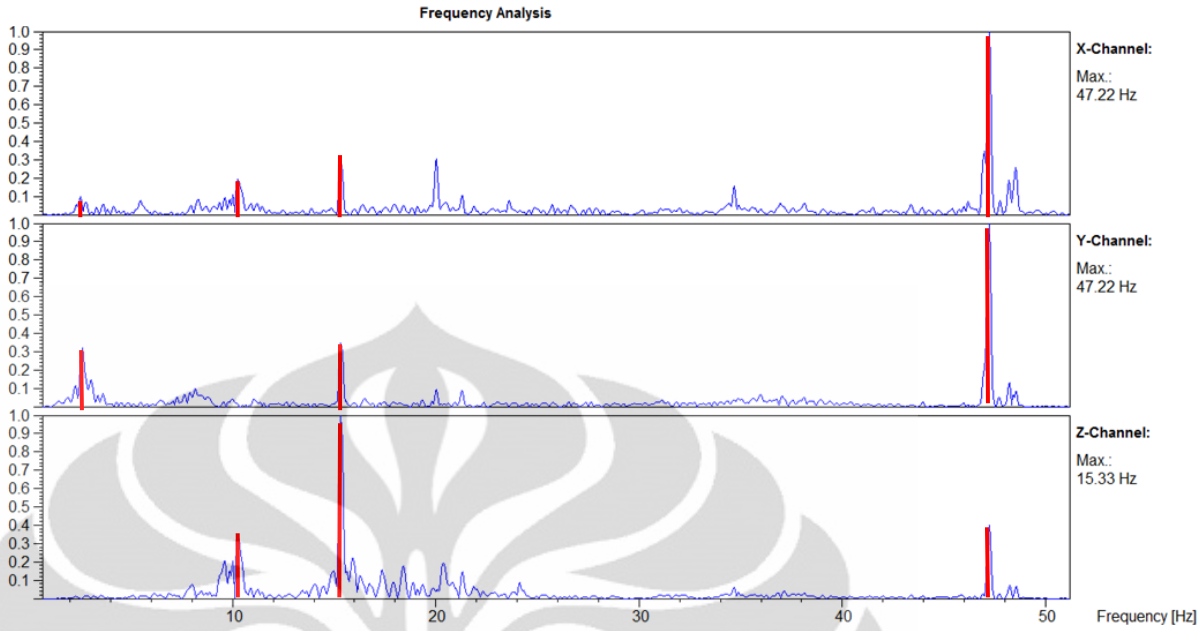
Maka $\zeta = \frac{f_b - f_a}{2 f_n} = \frac{2,668 - 2,616}{2x2,624} = 0,0099 = 0,99\ \%$

2. Posisi 2

Gambar 4.11. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 2



Gambar 4.12. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 2



Gambar 4.13. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah X Posisi 2

Untuk eksitasi pukulan *hammer* di posisi kedua, terdapat 4 jenis mode yang tercatat oleh microtremor. Mode pertama memiliki frekuensi sebesar 2,639 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,3790 s (mode pertama struktur). Mode kedua yang diperoleh memiliki frekuensi sebesar 10,464 Hz (T = 0,0956 s) dimana ini merupakan mode ke-7 struktur dengan periode getar hasil pemodelan sebesar 0,0957 s.

Mode ketiga memiliki frekuensi sebesar 15,378 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,0650 s. Nilai ini berdekatan dengan mode ke-13 struktur dimana besarnya periode getar struktur untuk mode ke-13 adalah 0,0674 s. Untuk mode terakhir diperoleh frekuensi sebesar 47,225 s (T = 0,0212 s). Nilai ini berdekatan dengan mode ke-28 hasil pemodelan (T = 0,0246 s).

Untuk nilai rasio redaman struktur pada eksitasi ini dengan menggunakan frekuensi mode pertama diperoleh :

$f_n = 2,639 Hz$

$f_a = 2,584 Hz$

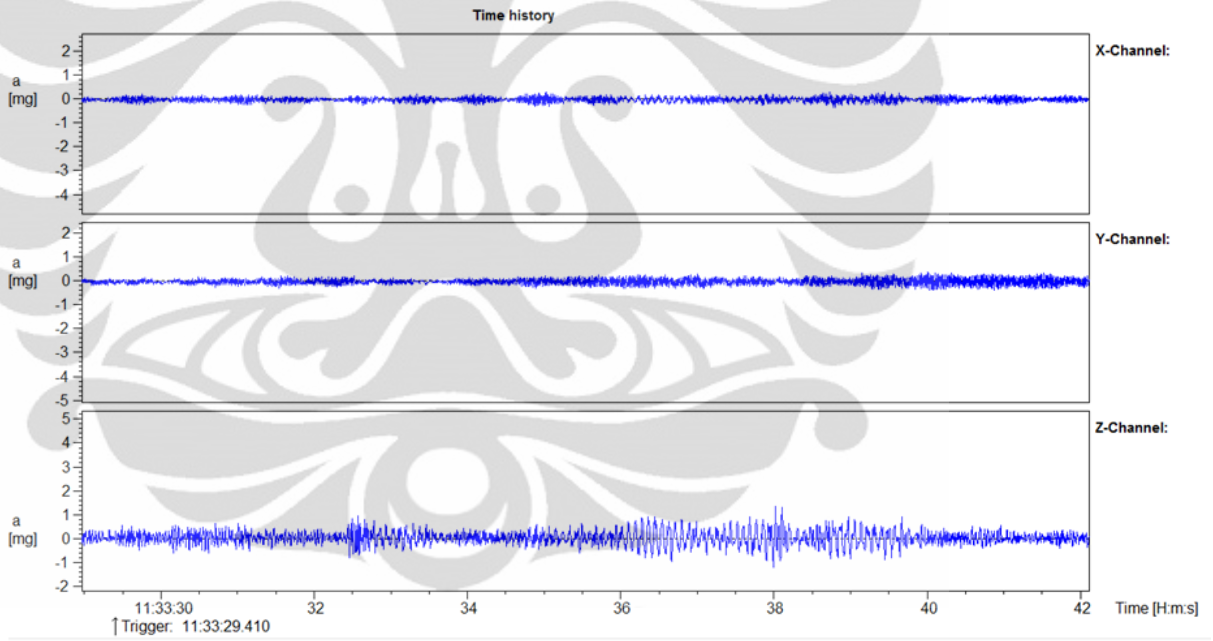
$f_b = 2,716 Hz$

Maka $\zeta = \frac{f_b - f_a}{2 f_n} = \frac{2,716 - 2,584}{2x2,639} = 0,0250 = 2,50\ \%$

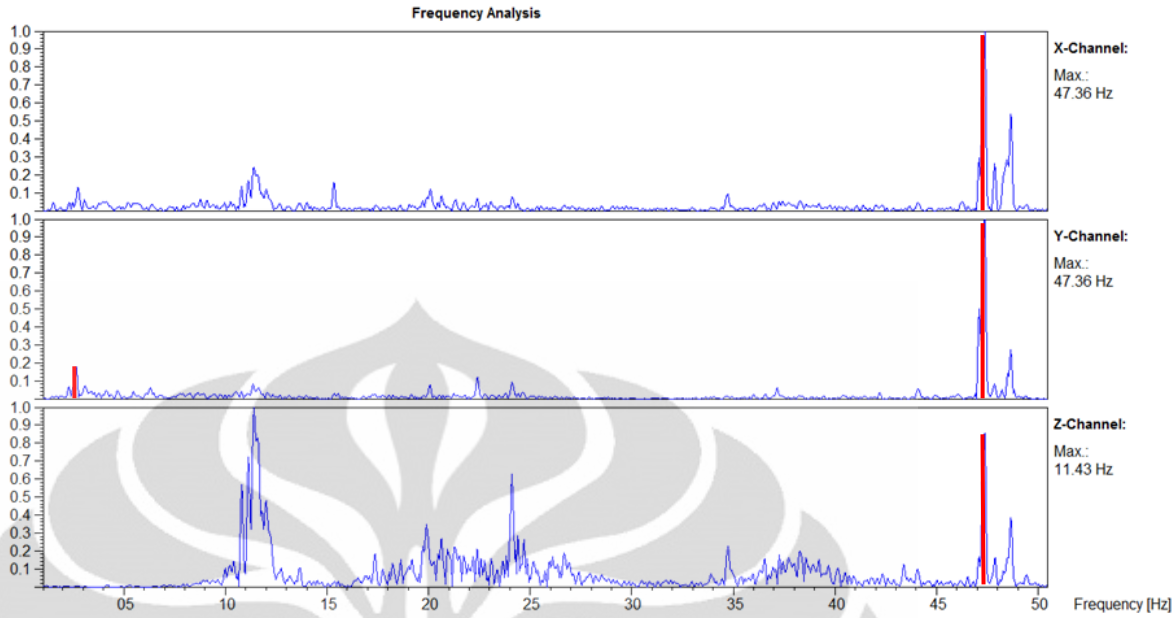
4.2.2.2.Eksitasi Pada Arah Y (Utara – Selatan)

1. Posisi 1

Gambar 4.14. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 1



Gambar 4.15. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 1



Gambar 4.16. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 1

Untuk pemberian eksitasi pukulan *hammer* pada arah y, terdapat dua mode yang dapat diamati. Mode pertama memiliki frekuensi sebesar 2,641 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,3787 s (mode pertama struktur). Untuk mode yang kedua memiliki frekuensi sebesar 47,369 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,0211 s. Nilai ini berdekatan dengan mode ke-28 hasil pemodelan (T = 0,0246 s).

Untuk nilai rasio redaman struktur pada eksitasi ini dengan menggunakan frekuensi mode pertama diperoleh :

$f_n = 2,641 Hz$

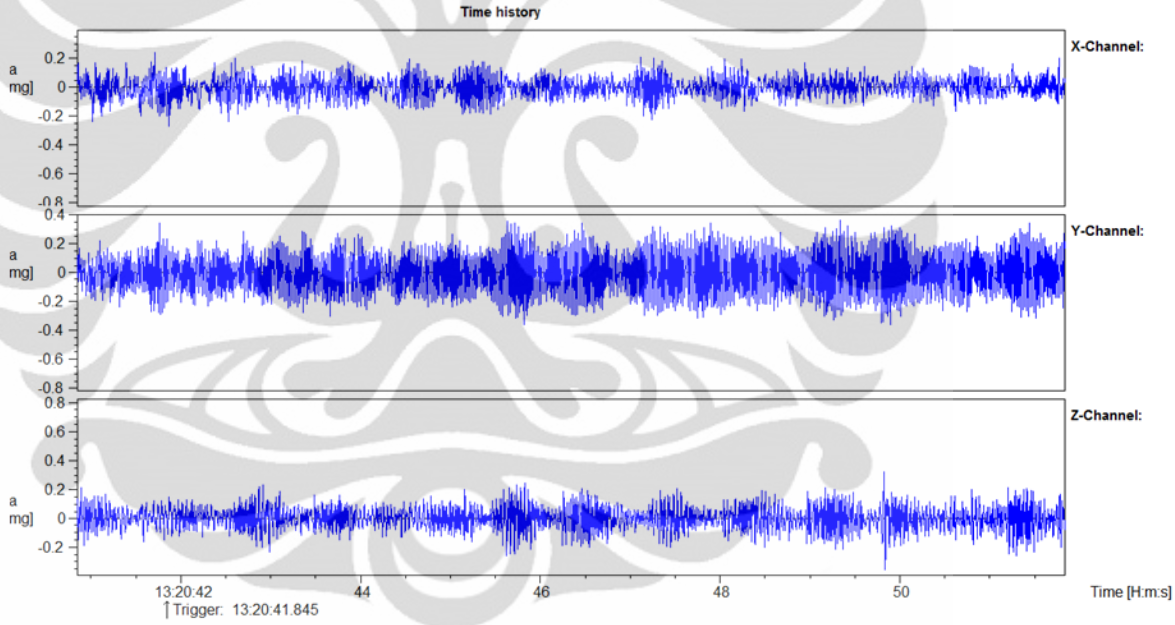
$f_a = 2,629 Hz$

$f_b = 2,650 Hz$

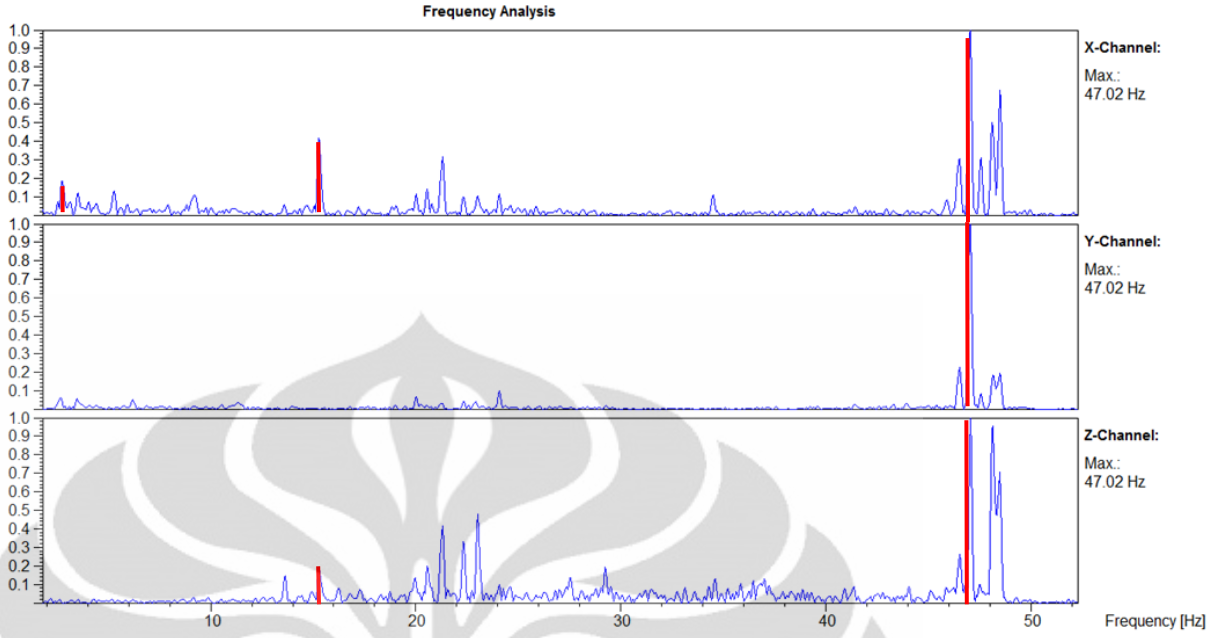
Maka $\zeta = \frac{f_b - f_a}{2 f_n} = \frac{2,650 - 2,629}{2x2,641} = 0,0039 = 0,39\ \%$

2. Posisi 2

Gambar 4.17. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 2



Gambar 4.18. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 2



Gambar 4.19 FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah Y Posisi 2

Respon yang diperoleh dari pemberian eksitasi ini adalah tiga mode. Mode pertama memiliki frekuensi sebesar 2,548 s atau memiliki periode getar sebesar 0,3925 s (mode pertama struktur). Untuk mode kedua yang diperoleh memiliki frekuensi sebesar 15,919 Hz (T = 0,0628 s). Nilai ini berdekatan dengan mode ke-13 struktur dimana besarnya periode getar struktur untuk mode ke-13 adalah 0,0674 s. Untuk mode yang terakhir diperoleh frekuensi sebesar 47,919 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,0209 s. Nilai ini berdekatan dengan mode ke-28 hasil pemodelan (T = 0,0246 s).

Untuk nilai rasio redaman struktur pada eksitasi ini dengan menggunakan frekuensi mode pertama diperoleh :

$f_n = 2,548Hz$

$f_a = 2,504Hz$

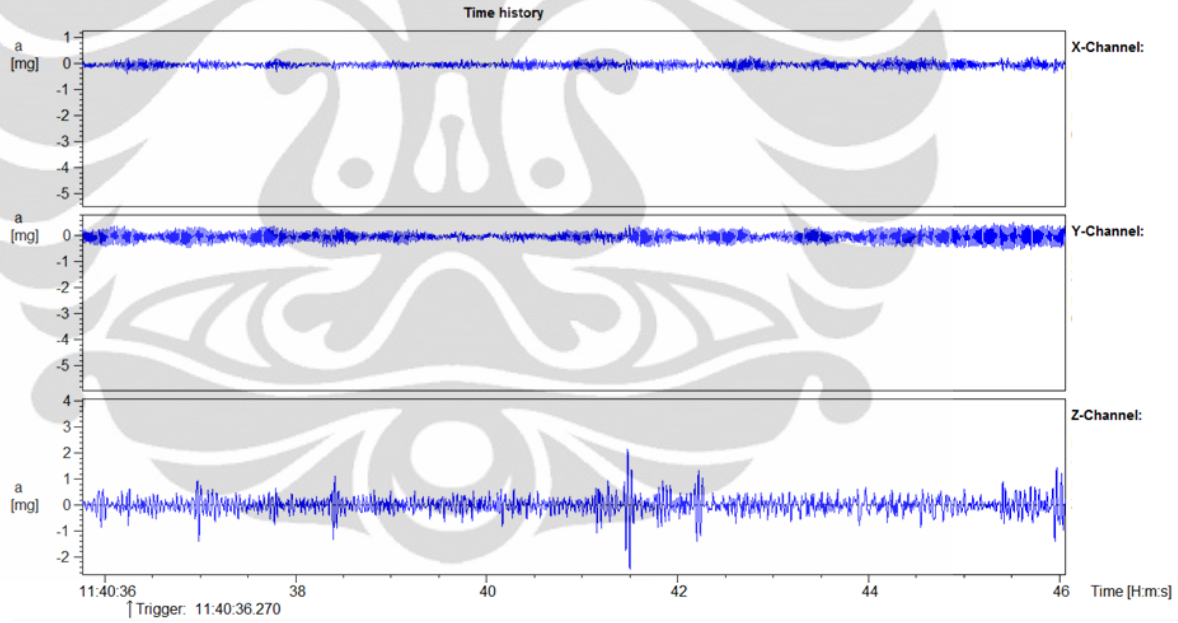
$f_b = 2.584Hz$

Sehingga rasio redamannya : $\zeta = \frac{2,584 - 2,504}{2x2,548} = 0,0157 = 1,57\%$

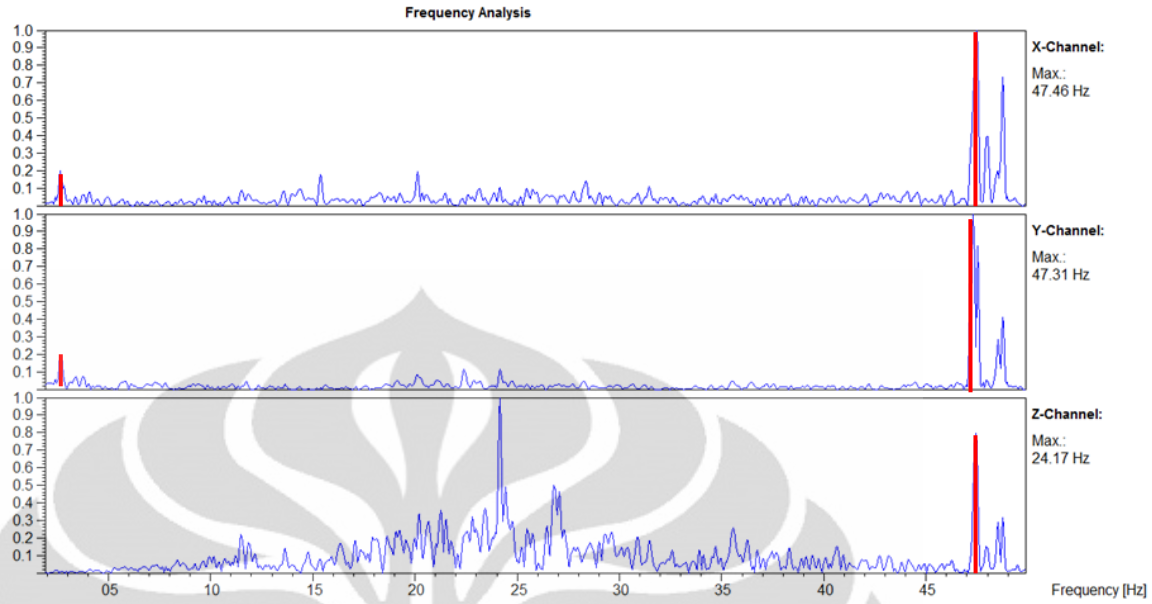
4.2.2.1.Eksitasi Pada Arah Z

1. Posisi 1

Gambar 4.20. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 1



Gambar 4.21. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 1



Gambar 4.22. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 1

Pada eksitasi ini mode yang dapat diidentifikasi hanya dua mode. Mode pertama memiliki frekuensi sebesar 2,526 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,3959 s. Mode ini merupakan mode pertama dari struktur dimana dari hasil pemodelan diperoleh mode pertama memiliki periode getar sebesar 0,4484 s. Untuk mode kedua memiliki frekuensi sebesar 47.499 s atau memiliki periode getar sebesar 0,0211 s. Nilai ini berdekatan dengan mode ke-28 hasil pemodelan (T = 0,0246 s).

Untuk nilai rasio redaman struktur pada eksitasi ini dengan menggunakan frekuensi mode pertama diperoleh :

$f_n = 2,526 Hz$

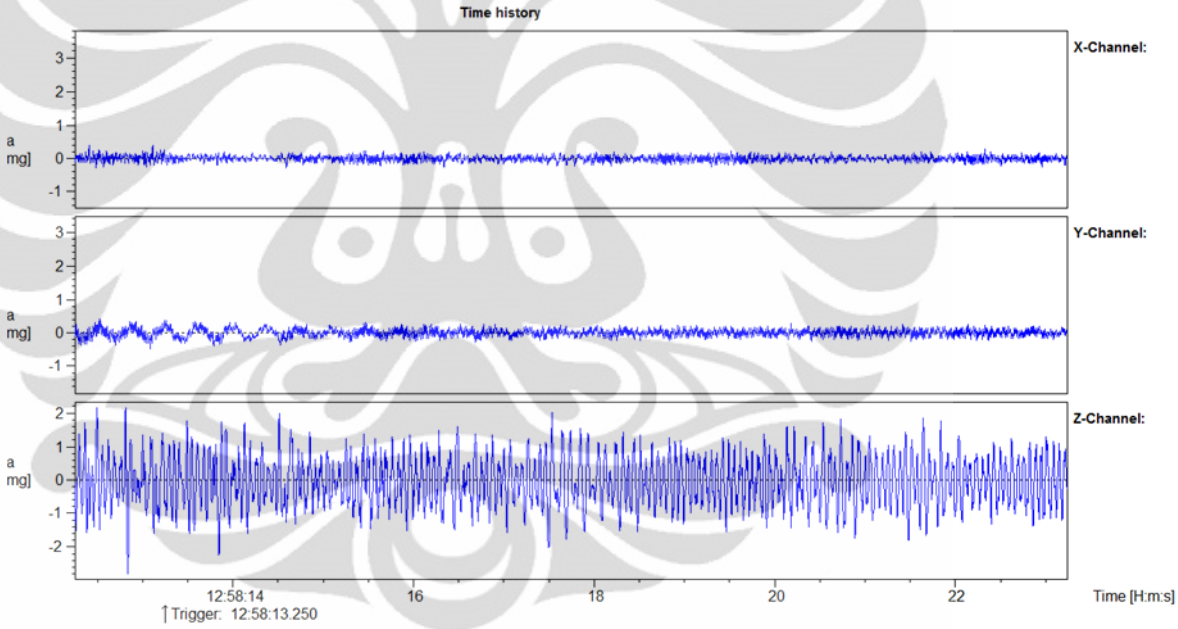
$f_a = 2,515 Hz$

$f_b = 2,688 Hz$

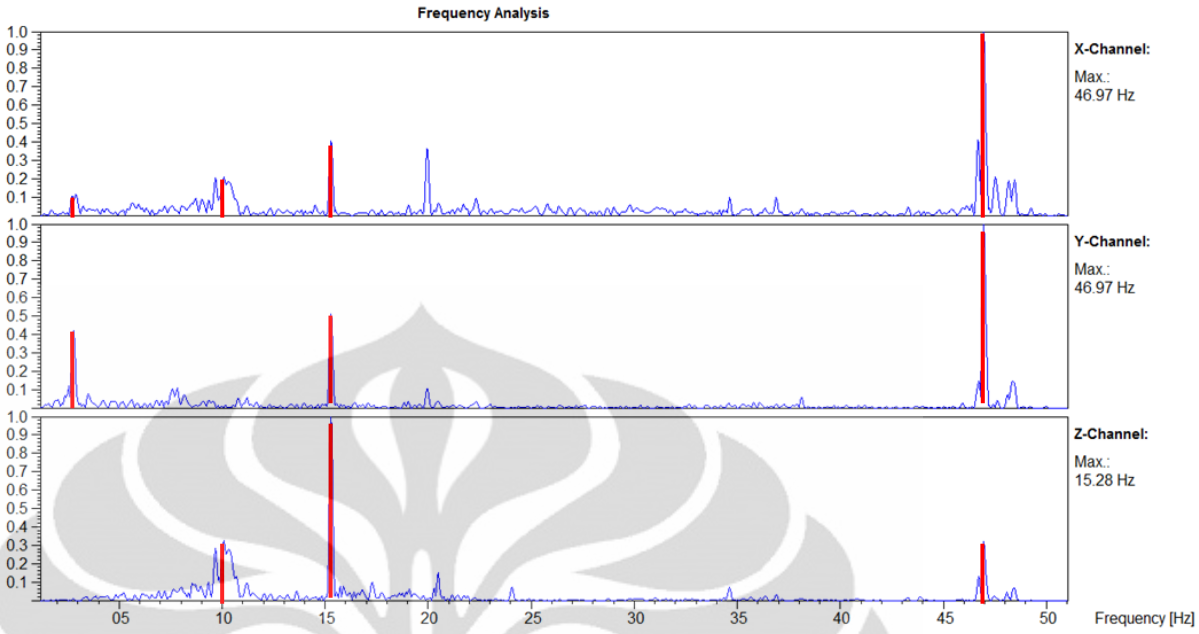
Sehingga rasio redamannya : $\zeta = \frac{2,688 - 2,515}{2x2,526} = 0,0342 = 3,42\ \%$

2. Posisi 2

Gambar 4.23. Pemberian Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 2



Gambar 4.24. *Time History* untuk Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 2



Gambar 4.25. FRF untuk Eksitasi *Hammer* Arah Z Posisi 2

Dari kurva FRF untuk eksitasi *hammer* arah z terdapat empat mode yang dapat diidentifikasi. Untuk mode yang pertama memiliki frekuensi sebesar 2,729 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,3664 s. Mode ini merupakan mode pertama dari struktur dimana dari hasil pemodelan diperoleh bahwa periode getar pertama struktur sebesar 0,4954 s. Untuk mode kedua yang diperoleh memiliki frekuensi sebesar 10,464 Hz (T= 0,0956 s) dimana ini merupakan mode ke-7 struktur. Untuk nilai ketiga diperoleh besarnya frekuensi adalah 15,287 (T = 0,0654). Nilai ini berdekatan dengan mode ke-13 struktur dimana besarnya periode getar struktur untuk mode ke-13 adalah 0,0674 s. Untuk mode yang terakhir memiliki frekuensi sebesar 46,952 Hz (T = 0,0212 s) Nilai ini berdekatan dengan mode ke-28 hasil pemodelan (T = 0,0246 s).

Untuk nilai rasio redaman struktur pada eksitasi ini dengan menggunakan frekuensi mode pertama diperoleh :

$f_n = 2,729 Hz$

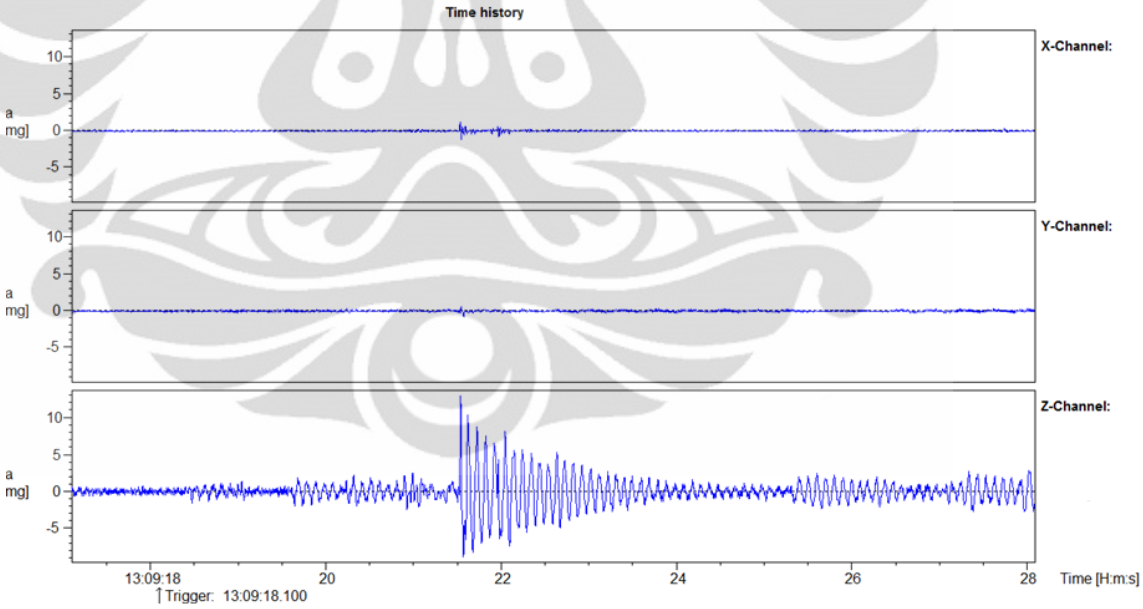
$f_a = 2,677 Hz$

$f_b = 2,812 Hz$

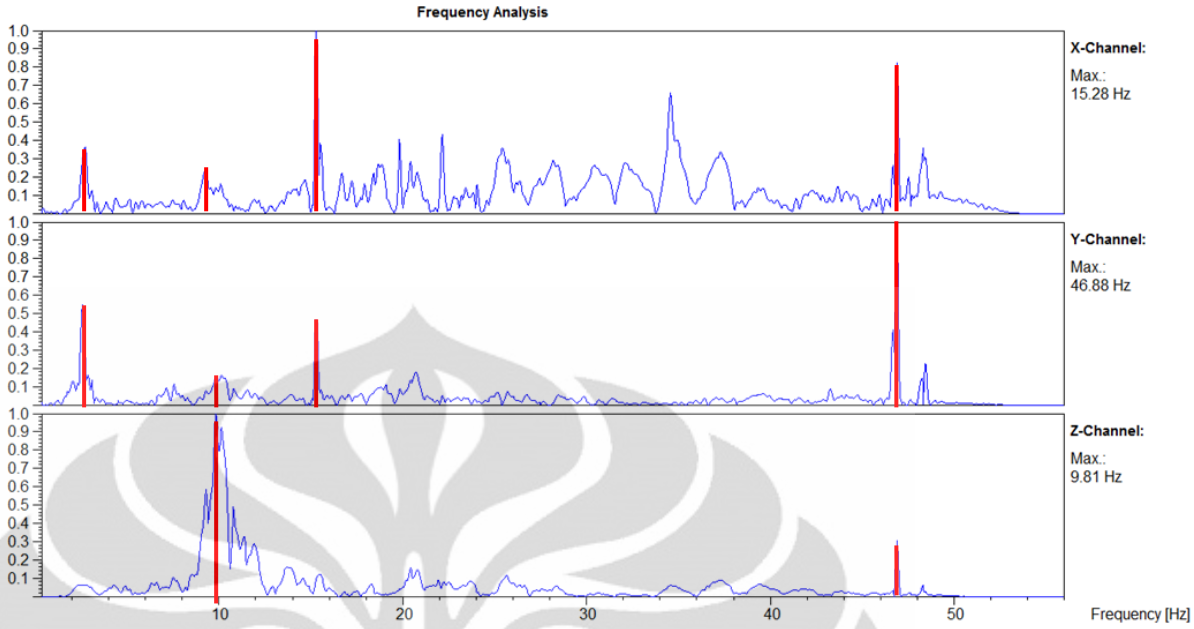
Sehingga rasio redamannya : $\zeta = \frac{2,812 - 2,677}{2x2,729} = 0,0247 = 2,47\%$

4.2.3. Eksitasi Berupa Lompatan

Gambar 4.26. Pemberian Eksitasi Lompatan



Gambar 4.27. *Time History* untuk Eksitasi Lompatan



Gambar 4.28. FRF untuk Eksitasi Lompatan

Dari kurva FRF untuk eksitasi lompat dapat dilihat bahwa terdapat empat mode yang dapat diketahui. Yang pertama memiliki frekuensi sebesar 2,548 Hz atau memiliki periode getar sebesar 0,3925 s. Ini merupakan mode pertama dari struktur. Mode yang kedua memiliki frekuensi sebesar 9,287 Hz (T = 0,1077 s). Ini merupakan mode ke-7 struktur (T = 0,0957 s). Untuk mode ketiga memiliki frekuensi sebesar 15,287 Hz (T = 0,0654 s). Nilai ini berdekatan dengan mode ke-13 struktur dimana besarnya periode getar struktur untuk mode ke-13 adalah 0,0674 s. Untuk nilai mode keempat memiliki frekuensi sebesar 46,861 Hz (periode getar = 0,0213 s). Nilai ini berdekatan dengan mode ke-28 hasil pemodelan (T = 0,0246 s).

Untuk nilai rasio redaman struktur pada eksitasi ini dengan menggunakan frekuensi mode pertama diperoleh :

$f_n = 2,548Hz$
$f_a = 2,508Hz$
$f_b = 2,710Hz$

Sehingga rasio redamannya : $\zeta = \frac{2,710 - 2,508}{2x2,548} = 0,0397 = 3,97\%$

4.3. Analisis Hasil Pemodelan Dan Eksperimen

Data periode getar hasil eksperimen untuk tiap eksitasi dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.2. Perbandingan Periode Getar Hasil Eksperimen

No	Jenis Eksitasi		Periode Getar Hasil Eksperimen (s)			
			Mode 1	Mode 7	Mode 13	Mode 28
1	Tanpa Eksitasi		0,3767	-	-	0,0213
2	Pukulan *Hammer* Arah X	Posisi 1	0,3811	-	-	0,0212
		Posisi 2	0,3790	0,0956	0,0650	0,0212
3	Pukulan *Hammer* Arah Y	Posisi 1	0,3787	-	-	0,0211
		Posisi 2	0,3925	-	0,0628	0,0209
4	Pukulan *Hammer* Arah Z	Posisi 1	0,3959	-	-	0,0211
		Posisi 2	0,3664	0,0956	0,0654	0,0212
5	Lompatan		0,3925	0,1077	0,0654	0,0213

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa eksperimen ini secara keseluruhan mampu mengidentifikasi respon struktur gedung Engineering Center untuk empat mode, yaitu mode pertama, mode ke-7, mode ke-13, dan mode ke-28. Sedangkan untuk mode struktur yang lainnya cukup sulit diidentifikasi karena adanya *noise*. Untuk membedakan antara frekuensi alami struktur dengan frekuensi *noise* adalah dengan melihat frekuensi yang selalu muncul pada tiap pemberian eksitasi. Karena *noise* sifatnya acak, maka yang termasuk *noise* besar nilai frekuensinya tidak akan selalu sama pada tiap pemberian eksitasi. Sedangkan jika termasuk frekuensi alami struktur, maka nilai frekuensinya akan selalu sama untuk tiap pemberian eksitasi. Untuk penentuan mode struktur adalah dengan mencocokkan nilai periode getar hasil eksperimen dengan nilai periode getar terdekat hasil pemodelan. Selain itu adalah dengan melihat respon yang dominan muncul pada channel *microtremor*. Hal ini berkaitan dengan partisipasi massa dari hasil pemodelan. Jika partisipasi massa yang lebih besar ada pada arah x maka seharusnya pada saat eksperimen, respon yang lebih dominan ada pada *channel* x.

Penentuan mode pertama struktur dari hasil eksperimen adalah dari grafik FRF. Frekuensi pada mode ini lebih dominan pada *channel* y dimana hal ini sesuai dengan partisipasi massa mode pertama yang lebih besar pada arah y.

Selain itu, frekuensi ini merupakan nilai puncak pertama pada kurva FRF sehingga disimpulkan sebagai mode pertama struktur. Mode pertama dari hasil eksperimen berkisar antara 0,3664 – 0,3959 s. Sedangkan periode getar untuk mode pertama hasil pemodelan adalah 0,4484 s. Terlihat bahwa periode getar hasil eksperimen yang diperoleh relatif lebih kecil nilainya dibandingkan periode getar hasil pemodelan. Perbedaan nilai periode getar hasil eksperimen dan pemodelan untuk mode pertama cukup besar mencapai 14,62 %.

Untuk mode ke-7, penentuannya berdasarkan nilai periode getar yang terdekat dengan hasil pemodelan. Periode getar yang diperoleh dari hasil eksperimen berkisar antara 0,0956 – 0,1077 s dimana periode untuk mode ke-7 hasil pemodelan adalah 0,0957 s. Besarnya periode getar hasil eksperimen yang diperoleh untuk mode ini juga relatif lebih kecil dibandingkan dengan periode getar hasil pemodelan. Perbedaan nilai periode getar hasil eksperimen dan pemodelan untuk mode ke-7 mencapai 4,11 %.

Untuk mode ke-13, penentuannya berdasarkan nilai periode getar yang terdekat dengan hasil pemodelan. Besarnya periode getar hasil eksperimen juga relatif lebih kecil dibandingkan hasil pemodelan namun nilainya tidak terpaut jauh. Periode getar hasil pemodelan untuk mode ke-13 adalah sebesar 0,0674 s sedangkan hasil dari eksperimen berkisar diantara 0,0650 – 0,0654 s. Perbedaan nilai periode getar hasil eksperimen dan pemodelan untuk mode ke-13 mencapai 4,09 %.

Hasil eksperimen ini ternyata dapat menunjukkan respon struktur di mode yang sangat kecil, yaitu mode ke-28. Secara hasil pemodelan nilai periode getar untuk mode ini adalah sebesar 0,0246 s dan hasil yang diperoleh dari eksperimen adalah 0,0209 – 0,0213 s. Perbedaan nilai periode getar yang diperoleh cukup jauh namun hasil yang diperoleh dari eksperimen relatif lebih kecil dibandingkan dari hasil pemodelan. Perbedaan nilai periode getar hasil eksperimen dan pemodelan untuk mode ke-28 mencapai 13,97 %.

Dari hasil pemodelan dan eksperimen ini dapat diketahui bahwa nilai periode getar hasil eksperimen relatif lebih kecil dibandingkan dengan hasil pemodelan. Hal ini disebabkan karena pada pemodelan struktur, penulis tidak memodelkan tembok gedung Engineering Center dimana tembok ini merupakan

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

salah satu komponen peredam pada suatu struktur sehingga ketika melakukan eksperimen, faktor redaman yang bekerja pada struktur gedung tersebut cenderung lebih besar yang mengakibatkan respon yang diperoleh dari hasil eksperimen cenderung lebih kecil nilainya dari hasil pemodelan.

Dari hasil eksperimen ini juga dapat diketahui bahwa respon yang dominan yang terjadi pada struktur adalah respon dari mode-mode yang kecil seperti mode ke-28. Mode ini cenderung lebih dominan dibandingkan mode-mode awal struktur. Hal ini bisa dilihat dari grafik FRF (*Frequency Response Function*) dimana mode ke-28 selalu muncul untuk tiap eksitasi dan nilainya lebih dominan dari mode pertama. Hal ini disebabkan oleh pemberian eksitasi yang kurang besar pada struktur pada waktu eksperimen sehingga respon yang lebih dominan muncul adalah mode-mode kecil. Karena respon dari suatu struktur tergantung dari besarnya eksitasi yang diberikan terhadap struktur tersebut. Jika eksitasi yang diberikan relatif kecil, maka respon yang diberikan struktur tersebut juga relatif kecil.

Tabel 4.3. Perbandingan Periode Getar Hasil Eksperimen dan Pemodelan

No	Mode	Periode Getar (s)		% Perbedaan
		Eksperimen (Rata-Rata)	Pemodelan	
1	Mode 1	0,3829	0,4484	14,62
2	Mode 7	0,0996	0,0957	4,11
3	Mode 13	0,0645	0,0674	4,09
4	Mode 28	0,0212	0,0246	13,97

Parameter modal yang dapat diperoleh dari hasil eksperimen ini selain periode getar adalah rasio redaman struktur. Hasil rasio redaman struktur dari tiap eksitasi dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.4. Perbandingan Rasio Redaman Hasil Eksperimen

No	Jenis Eksitasi		Rasio Redaman Hasil Eksperimen
1	Tanpa Eksitasi		1,51 %
2	Pukulan Hammer Arah X	Posisi 1	0,99 %
		Posisi 2	2,50 %
3	Pukulan Hammer Arah Y	Posisi 1	0,39 %
		Posisi 2	1,57 %
4	Pukulan Hammer Arah Z	Posisi 1	3,42 %
		Posisi 2	2,47 %
5	Lompatan		3,97 %

Dapat dilihat bahwa rasio redaman yang diperoleh dari eksperimen nilainya bervariasi untuk tiap eksitasi. Nilai rasio redaman yang diperoleh adalah berkisar di nilai 0,39 % - 3,97 %. Hasil yang bervariasi ini dikarenakan eksitasi yang diberikan merupakan *human induce vibration* dimana besarnya eksitasi ini tidak dapat dikontrol nilainya. Untuk medapatkan rasio redaman struktur yang lebih akurat seharusnya frekuensi eksitasi yang diberikan pada struktur mendekati dengan frekuensi resonansinya karena respon struktur pada kondisi resonansi dikontrol oleh redaman dari sistem. Adapun nilai rasio redaman rata-rata dari hasil eksperimen adalah sebesar 2,10 %. Hasil rasio redaman ini berada dalam *range* nilai rekomendasi yang dikeluarkan oleh *Newmark & Hall* bahwa untuk struktur beton bertulang rasio redamannya berkisar antara 2 – 5 %.

BAB 5
PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil dari penelitian ini mampu mengidentifikasi empat mode struktur, yaitu mode pertama, mode ke-7, mode ke-13, dan mode ke-28.
2. Respon struktur hasil tes vibrasi (periode getar) relatif lebih kecil dibandingkan hasil pemodelan karena pada saat pemodelan, tembok gedung Engineering Center tidak ikut dimodelkan dimana tembok ini dapat menambah redaman pada sistem struktur.
3. Periode getar hasil eksperimen dan pemodelan untuk mode pertama memiliki perbedaan sekitar 14,62 %, untuk mode ke-7 sekitar 4,11 %, untuk mode ke-13 sekitar 4,09 %, dan untuk mode ke-28 sekitar 13,97 %.
4. Respon struktur yang dominan terjadi pada saat tes vibrasi adalah berasal dari mode – mode kecil, yaitu mode ke-28. Hal ini dikarenakan pemberian ekstitasi pada struktur gedung Engineering Center relatif kecil sehingga respon yang diberikan oleh struktur juga relatif kecil. Namun pemberian eksitasi ini juga dapat memunculkan mode pertama dari struktur gedung Engineering Center.
5. Rasio redaman struktur yang diperoleh dari hasil eksperimen adalah 2,10 % dimana rasio redaman ini sesuai dengan nilai rekomendasi yang dikeluarkan oleh *Newmark & Hall* untuk struktur beton bertulang rasio redamannya berkisar antara 2 – 5 %.
6. Metode tes vibrasi ini dapat digunakan untuk pengukuran periode getar dan redaman struktur.

5.2. Saran

1. Untuk penelitian *free vibration testing* sebaiknya menggunakan beban yang cukup besar agar mampu mengeksitasi struktur sehingga struktur bergetar dan respon yang diberikan oleh struktur merupakan mode – mode awal/utama.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

2. Pada saat melakukan tes vibrasi sebaiknya sensor yang digunakan cukup banyak agar kita dapat mengetahui respon struktur dari berbagai titik pengamatan secara bersamaan.
3. Jika parameter dinamik yang diperoleh dari hasil pemodelan dan eksperimen terlampau jauh nilainya, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai apakah struktur ekisting mengalami kerusakan atau tidak.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

DAFTAR REFERENSI

C, Michel, G, Stamm, & V, Poggi. (2008). *Ambient Vibration Recordings And Modal Analysis Of 5 Typical Buildings Of The Visp City (Valais, Switzerland)*. Journal.

Chopra, Anil K. (1995). *Dynamics Of Structures Theory And applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall.

Chopra, Anil K. (1996). *Modal Analysis of Liniear Dynamic Sistems: Physical Interpretation.* ASCE Journal of Structural Engineering Vol. 122, No. 5.

Crawford, R & Ward H.S. (1964). *Determination of Natural Periods Of Building*. Bulletin Of The Seismological Society Of America Vol. 54, No 6, pp.1743-1756.

Cunha, Alvaro & Caetano, Elsa. (2006). *Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures*. Sound and Vibration/June 2006.

De Silva, Clarence W. (2005). *Vibration and Shock Handbook*. CRC Press.

Fasel, Tim R. et.al. (2002). *Experimental Modal Analysis and Damage Detection In a Simulated Three Story Building*. Journal

He, Jimin & Fu, Zhi-Fang. (2001). *Modal Analysis*. Butterworth-Heinemann.

Inman, Daniel J. (1996). *Engineering Vibration*. Prentice Hall.

Ivanovic, S.S et.al. (1999). *Instrumented 7_storey Reinforced Concrete Building In Van Nuys, California : Ambient Vibration Surveys Following The Damage From The 1994 Northridge Earthquake*. Department of Civil Engineering University of Southern California. California.

Analisis periode ..., Radea Ariyadira, FT UI, 2011

Lamarche, Charles-Philippe et.al. (1972). *A Comparison Of Ambient And Forced-Vibration Testing Of Full Scale Concrete Structure*. Journal.

Oliveira, C.S. & Navarro, M. (2009). *Fundamental Periods Of Vibration Of RC Buildings In Portgal From In-Situ Experimental And Numerical Techniques*. Springer Science + Business Media B.V.2009.

Schwarz, Brian J. & Richardson, Mark H. (1999). *Experimental Modal Analysis*, Journal.

Sobaih, M et.al. (2008). *Estimation Of Dynamic Characteristics Of Existing Common Reinforced Concrete Buildings In Egypt Using Ambient Vibration Tests*. Departement of Structural Engineering, Faculty of Engineeering, Cairo University, Giza, Egypt.

Shabbir, F & Omenzetter, P. (2008). *Forced Vibration Testing Of A Thirteen Storey Concrete Building*. Departement of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

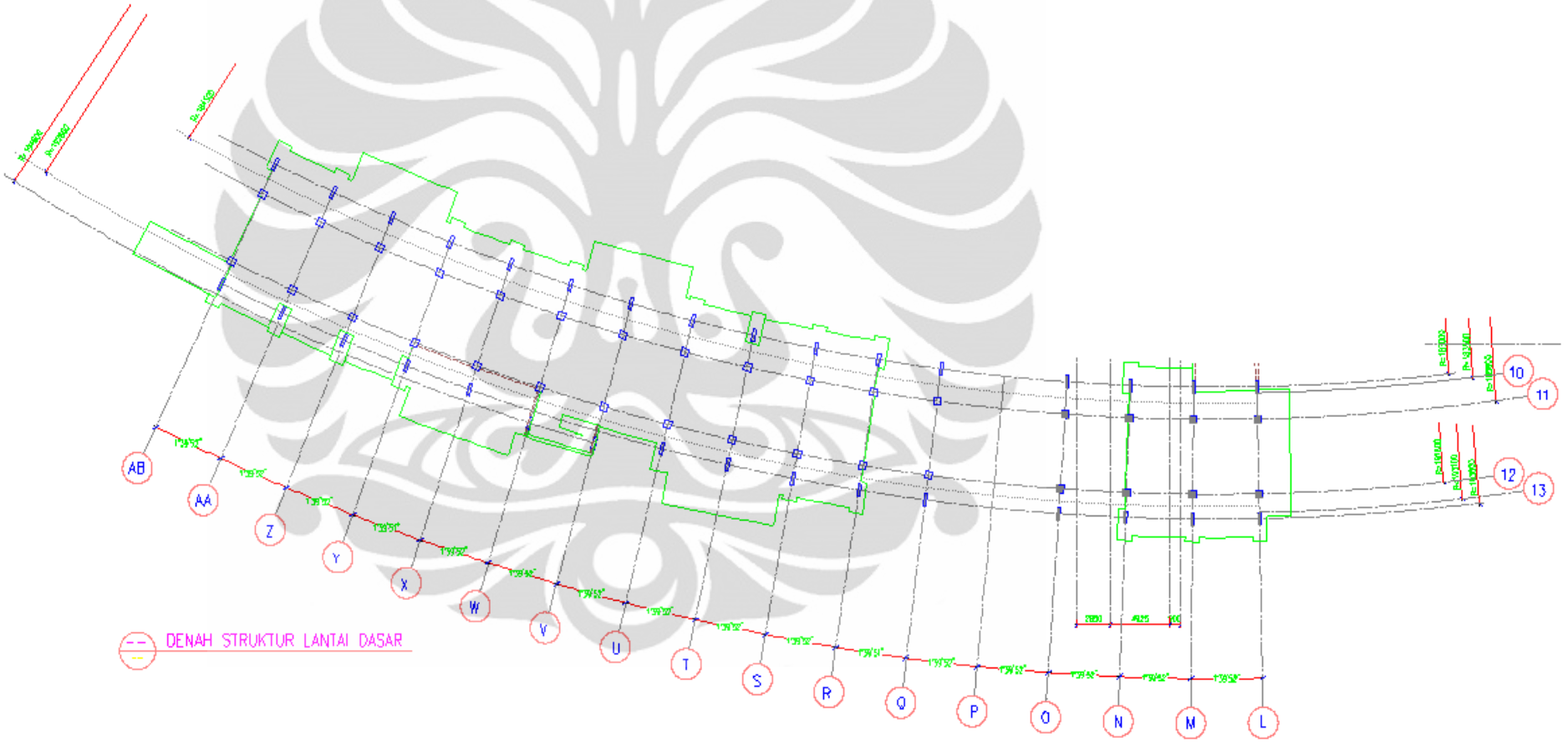
Tamura, Yukio et.al. (2002). *Ambient Vibration Testing & Modal Identification of An Office Building*. Journal.

Udrea, Andrei et.al. (2010). *Experimental Modal Characteristics of UTCB-FCCIA Building*. Journal.

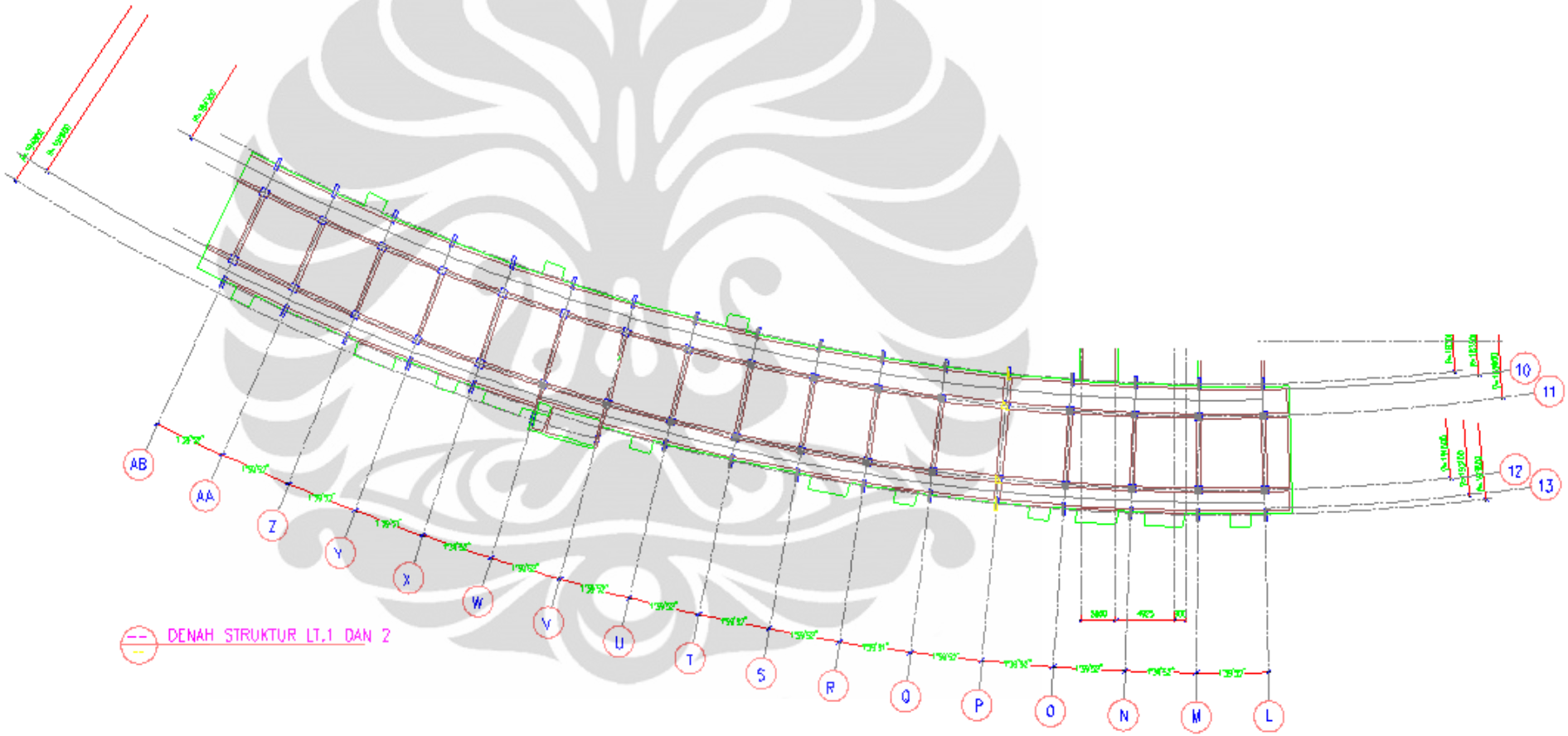
Yu, Eunjong et.al. (2006). *Forced Vibration Testing Of A Four Story RC Building Utilizing The Ness@UCLA Mobile Field Laboratory.* Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA Paper No. 1566

Lampiran A. Denah Gedung Engineering Center

Denah Lantai Dasar

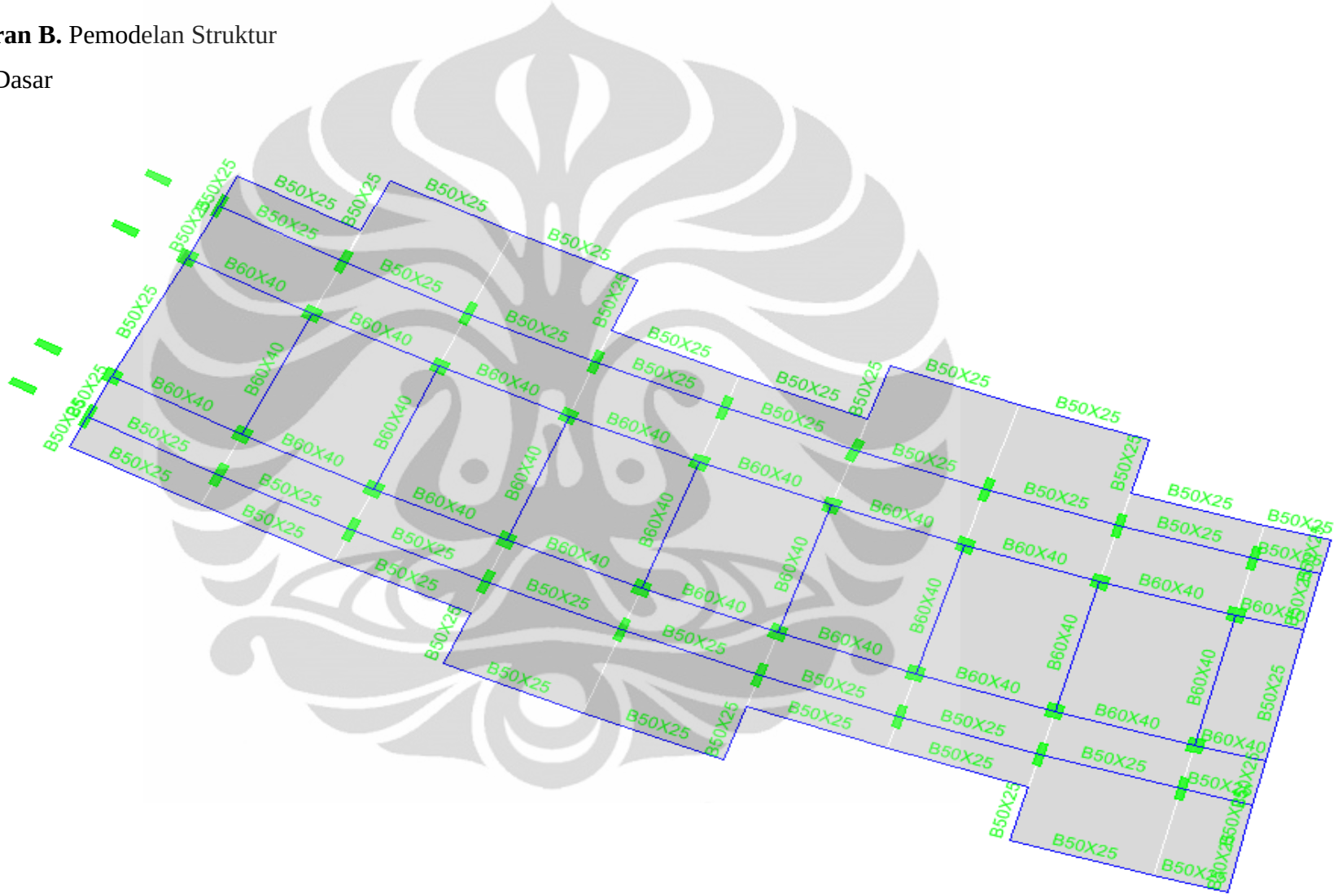


Denah Lantai 1 dan 2

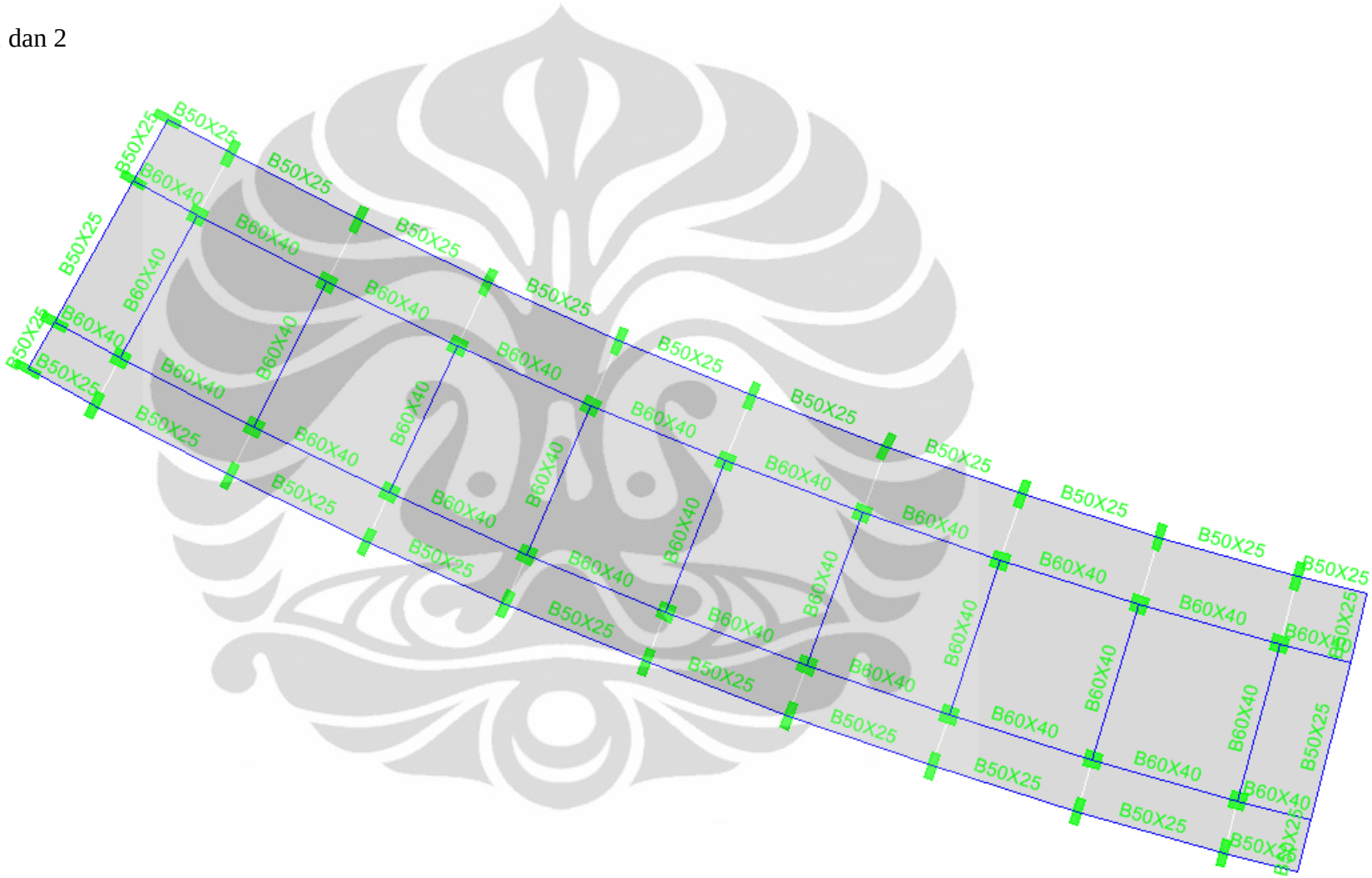


Lampiran B. Pemodelan Struktur

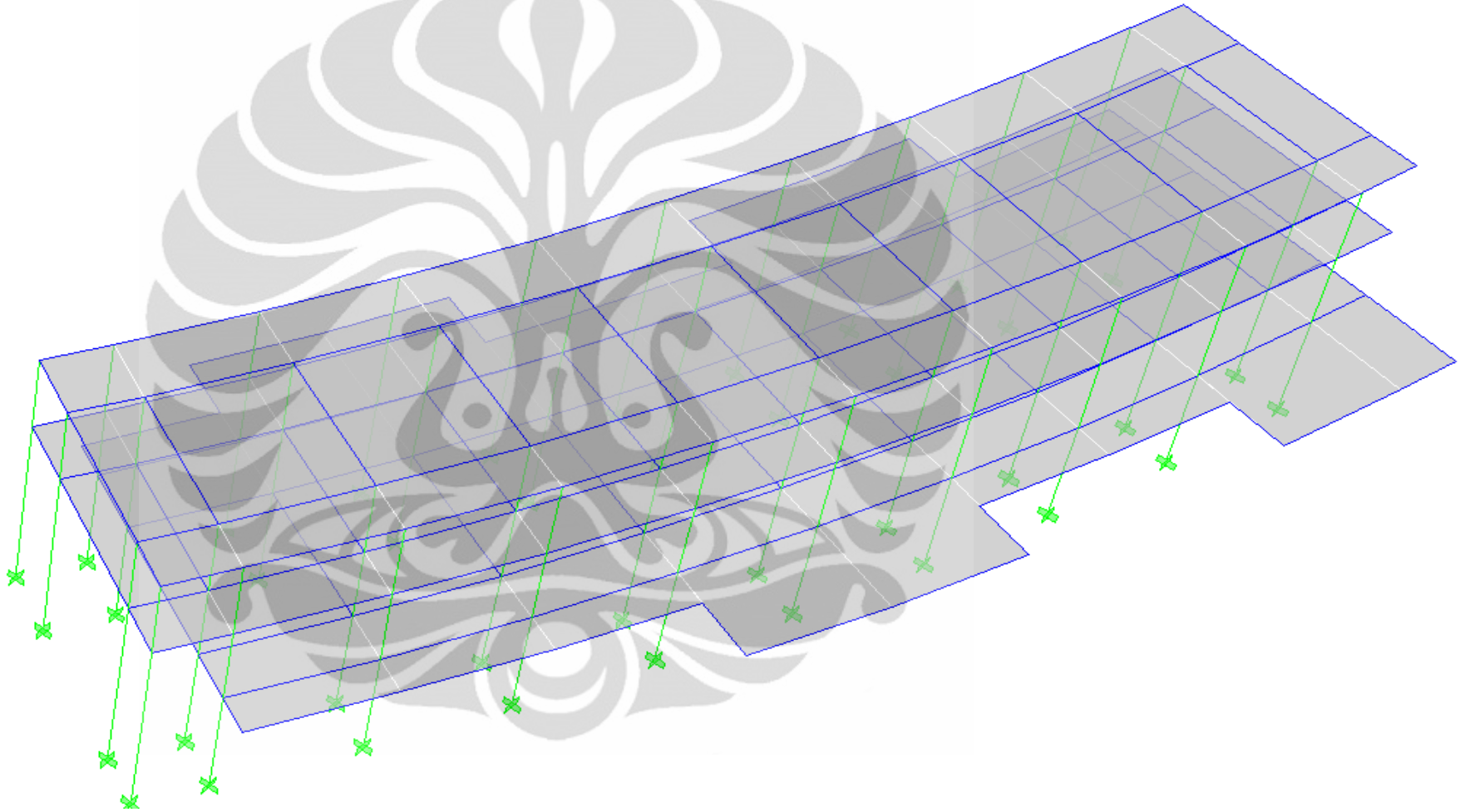
Lantai Dasar



Lantai 1 dan 2

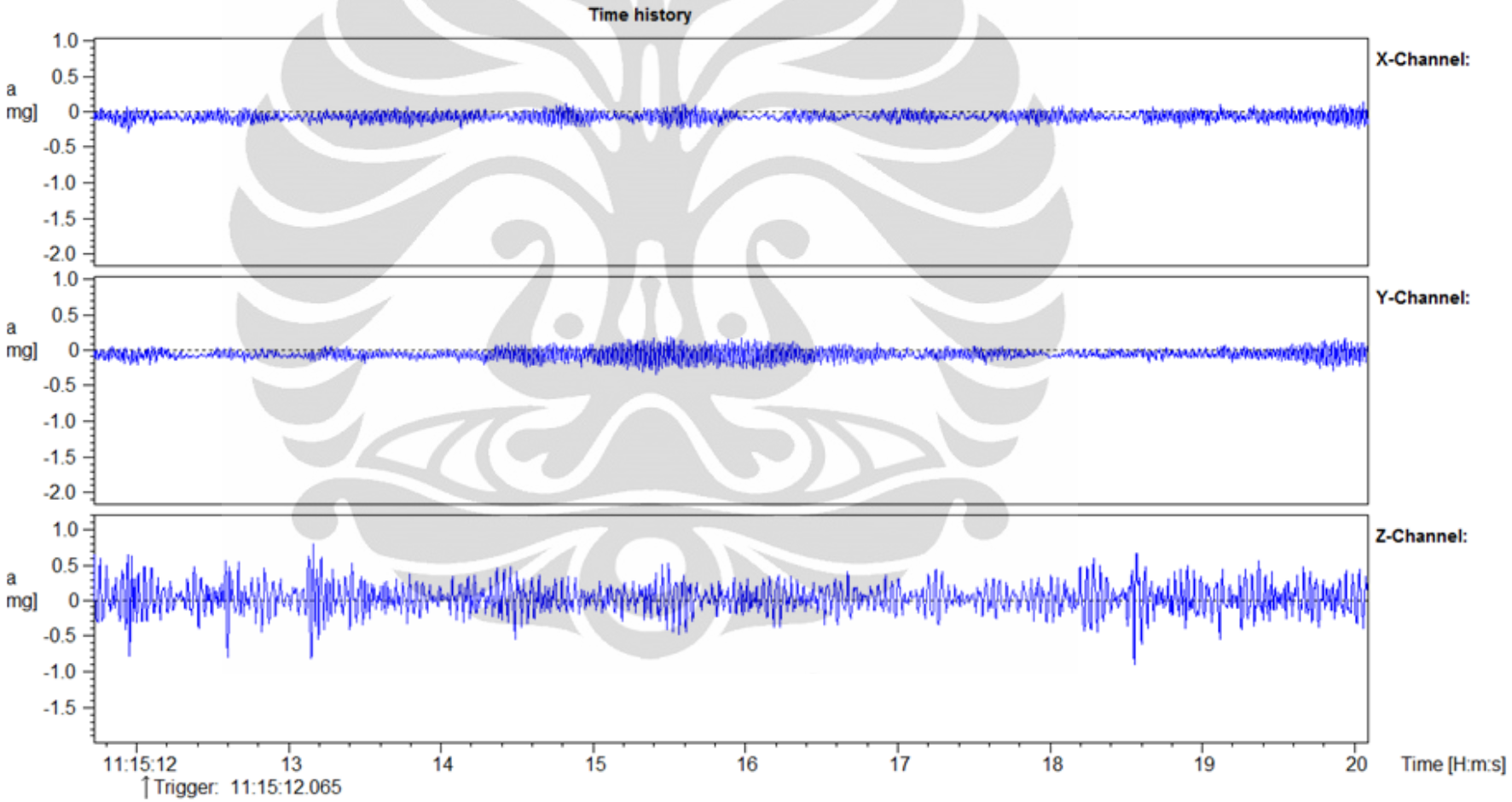


Tampak 3D

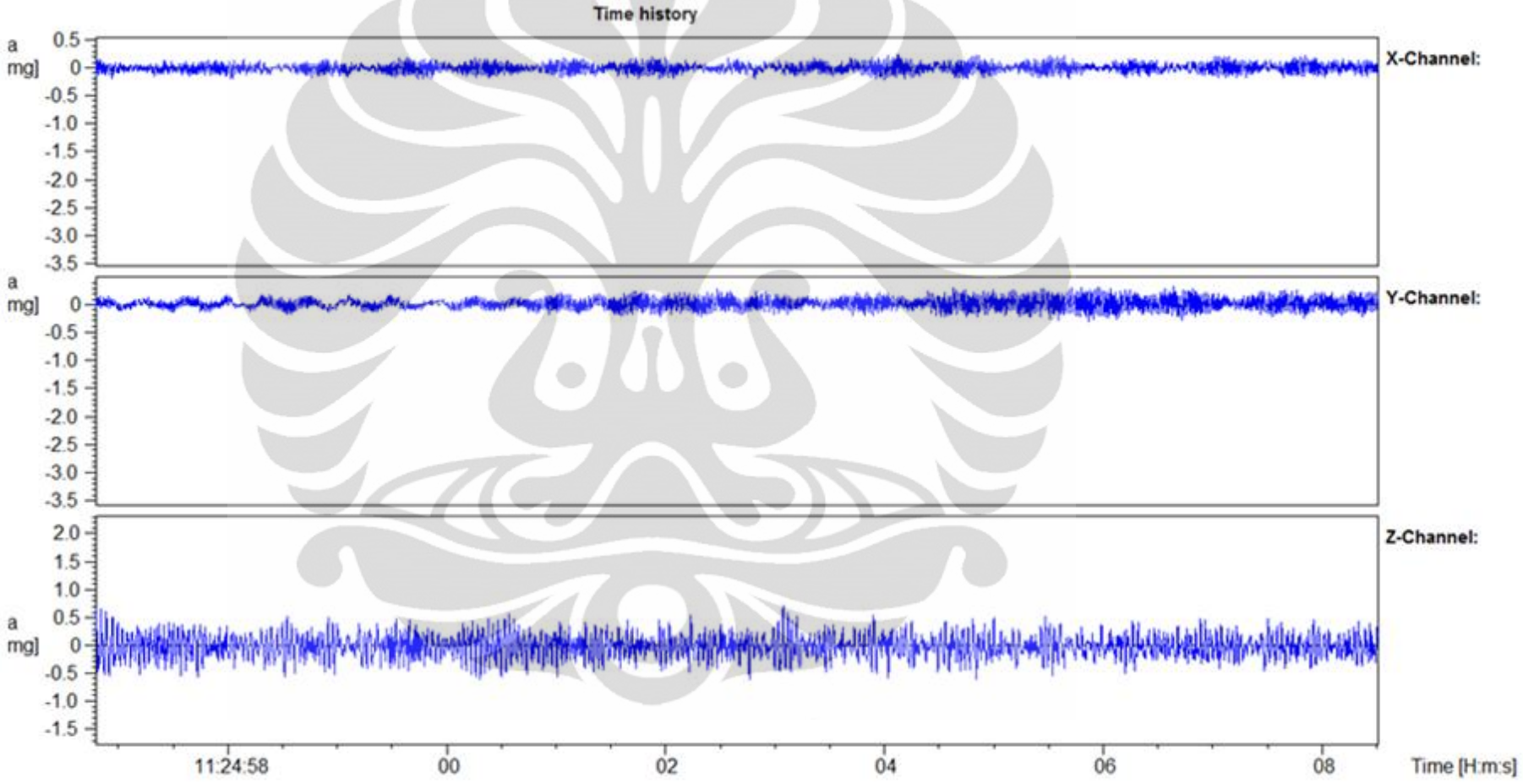


Lampiran C. Respon Getaran Bebas Struktur Akibat Tiap Jenis Eksitasi

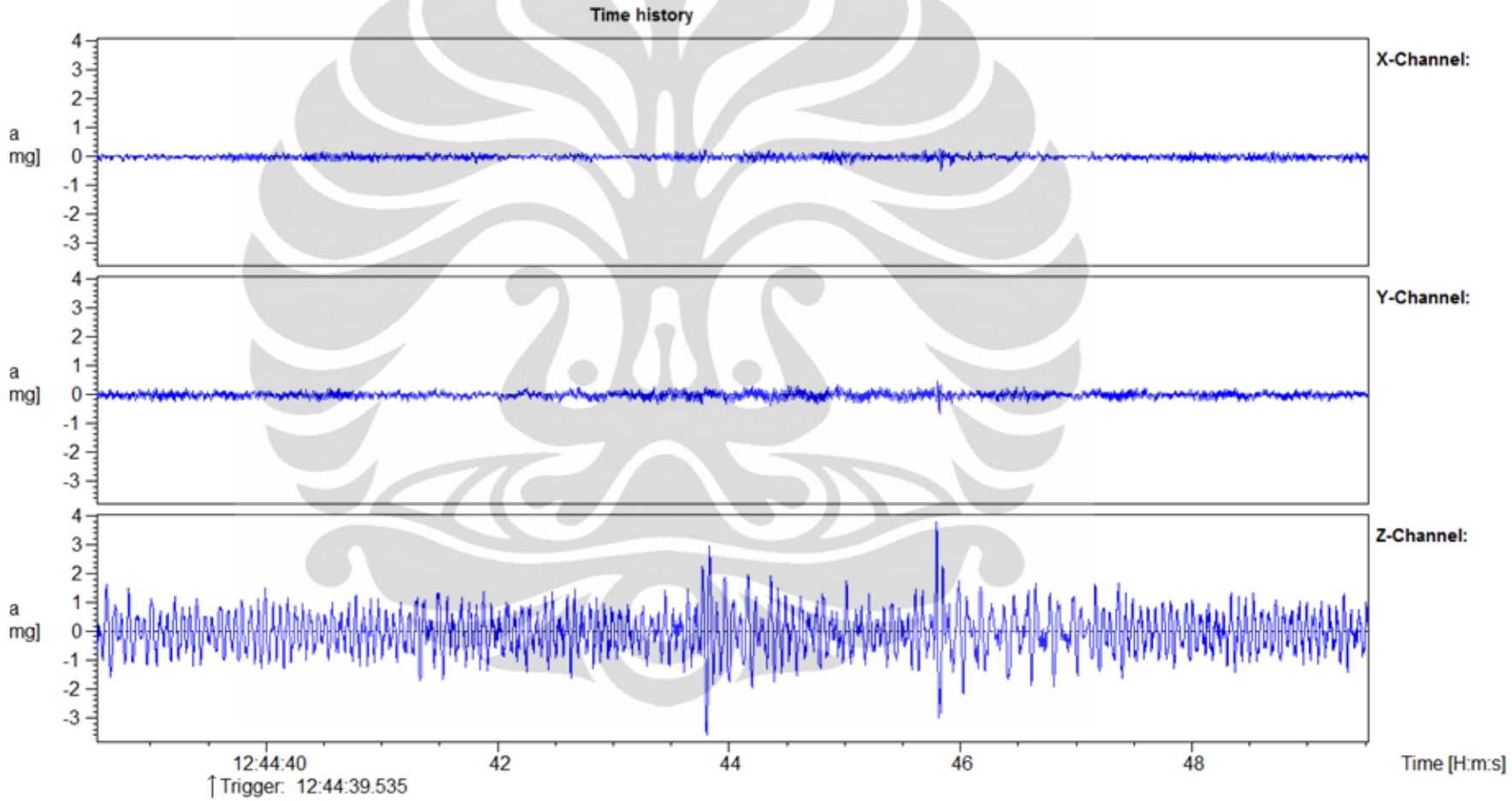
Respon Getaran Bebas Struktur (Tanpa Eksitasi)



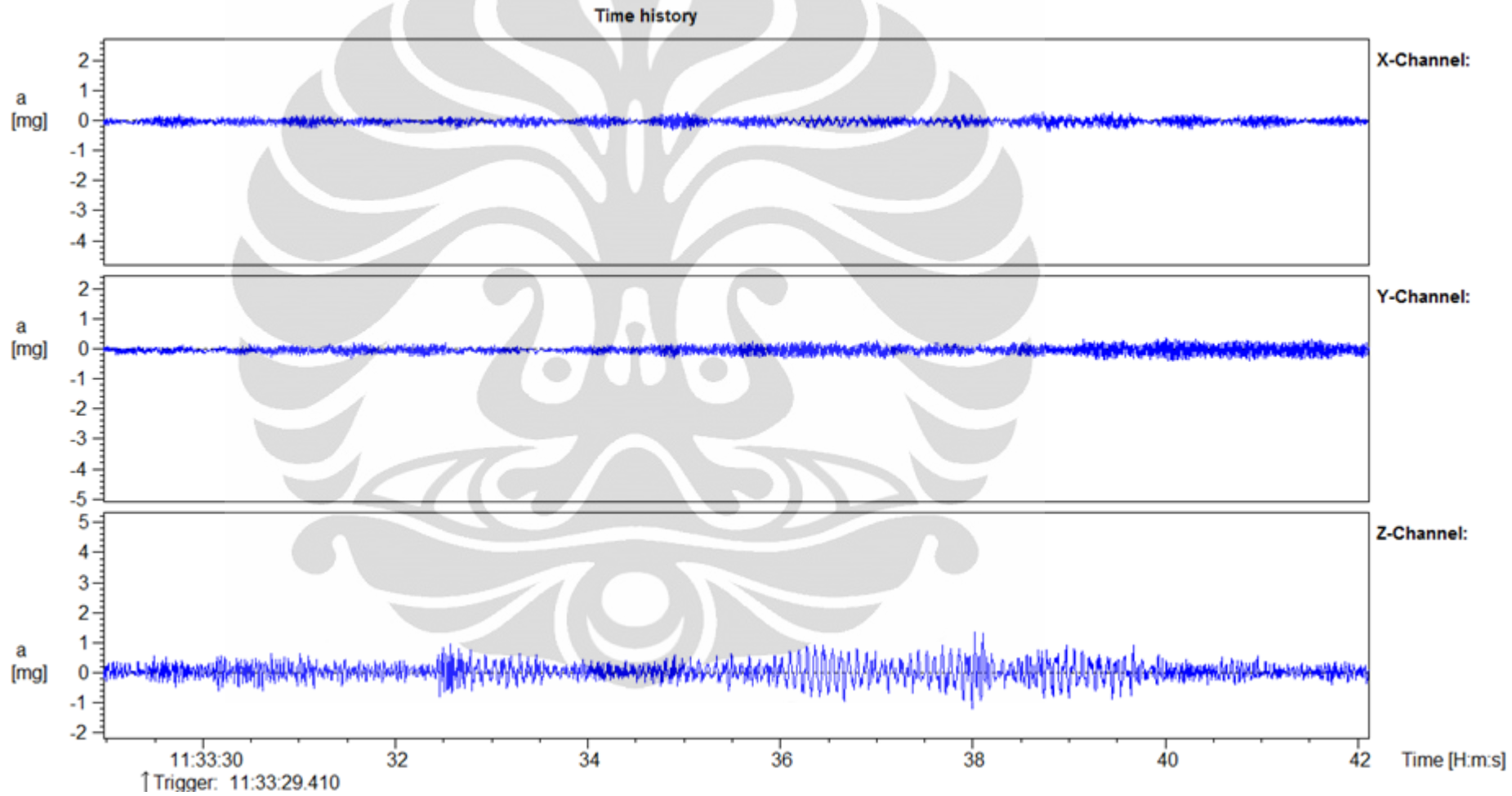
Respon Getaran Bebas Struktur (Pukulan *Hammer* Arah X Posisi 1)



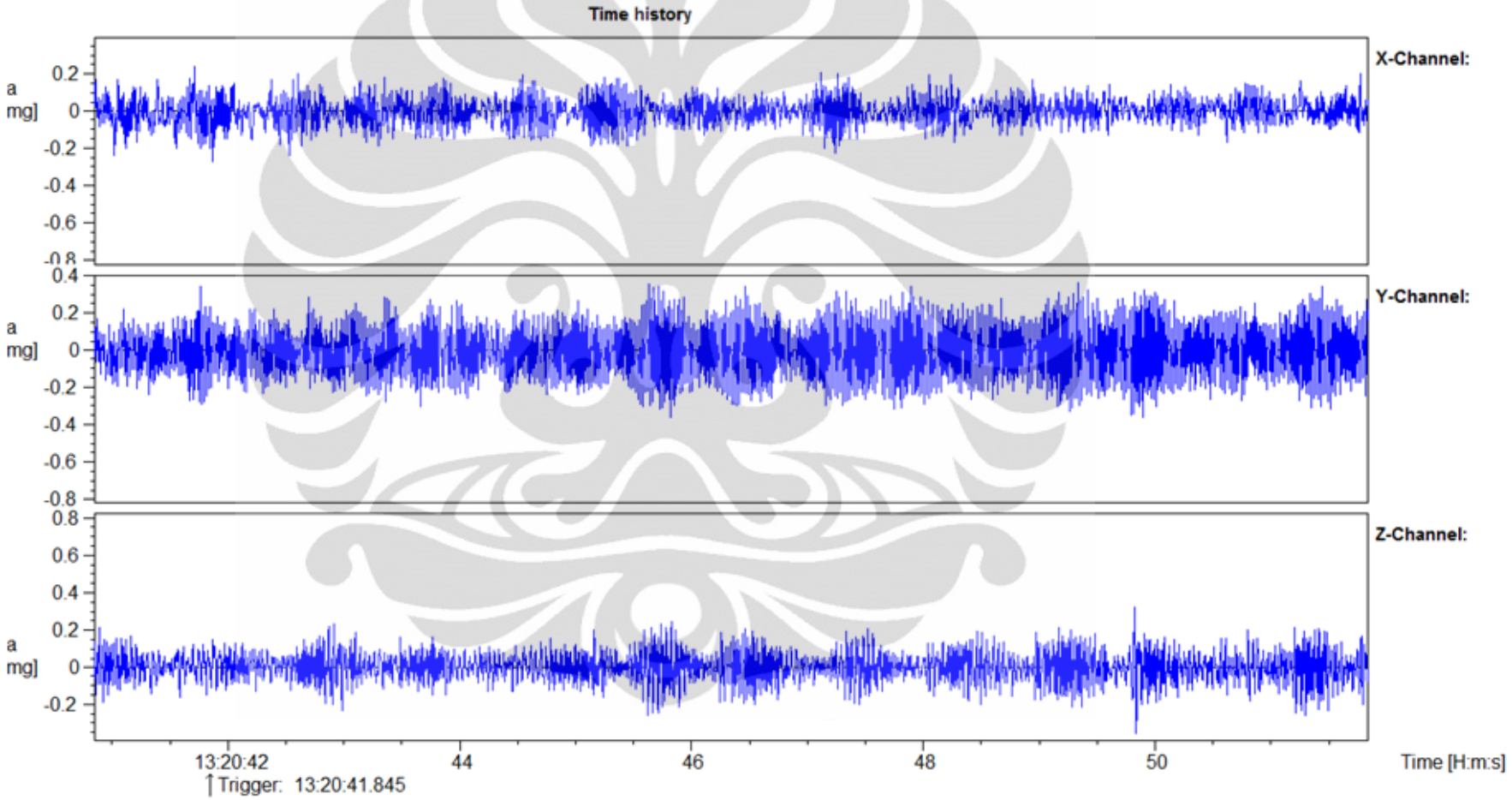
Respon Getaran Bebas Struktur (Pukulan *Hammer* Arah X Posisi 2)



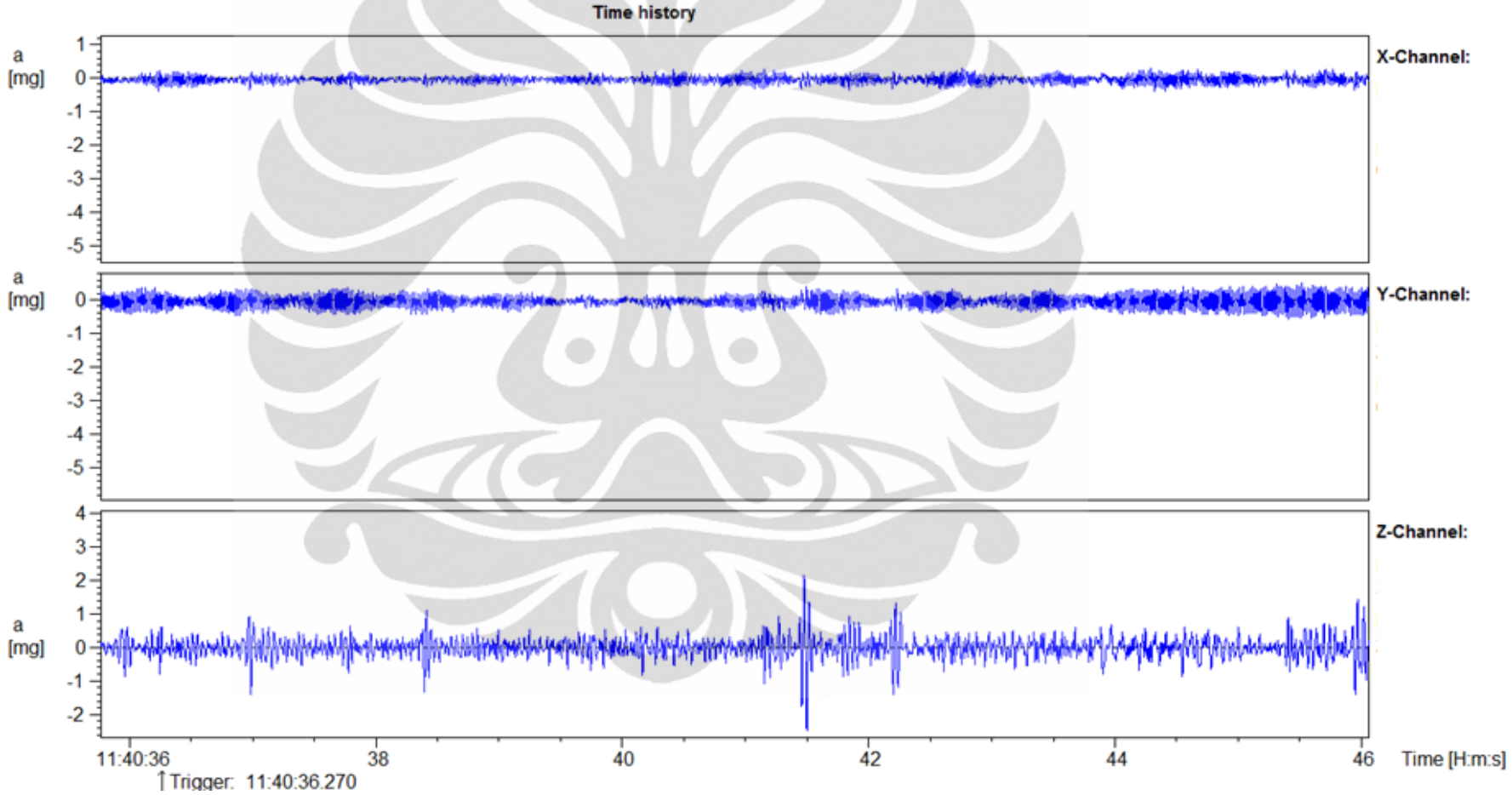
Respon Getaran Bebas Struktur (Pukulan *Hammer* Arah Y Posisi 1)



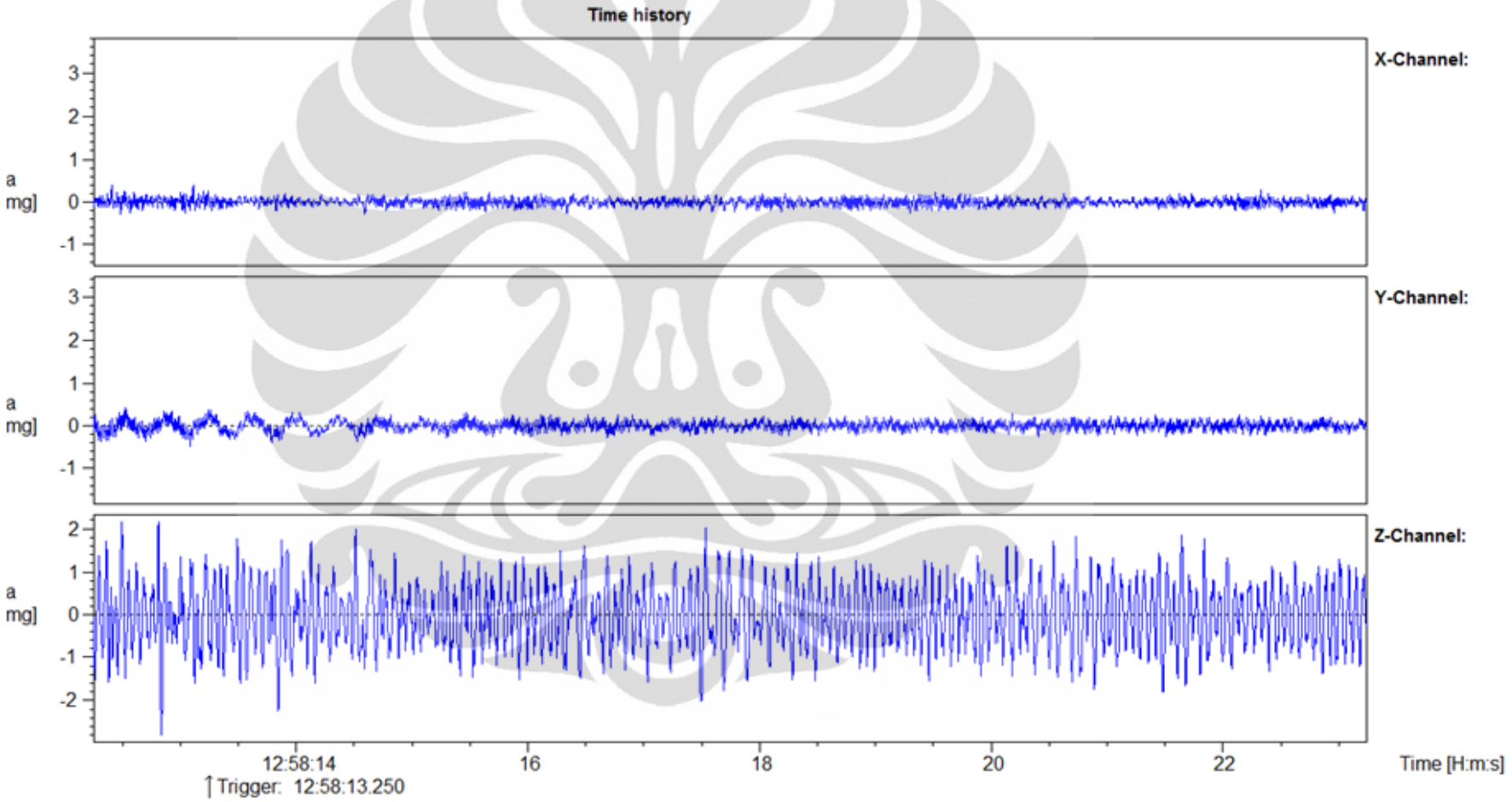
Respon Getaran Bebas Struktur (Pukulan *Hammer* Arah Y Posisi 2)



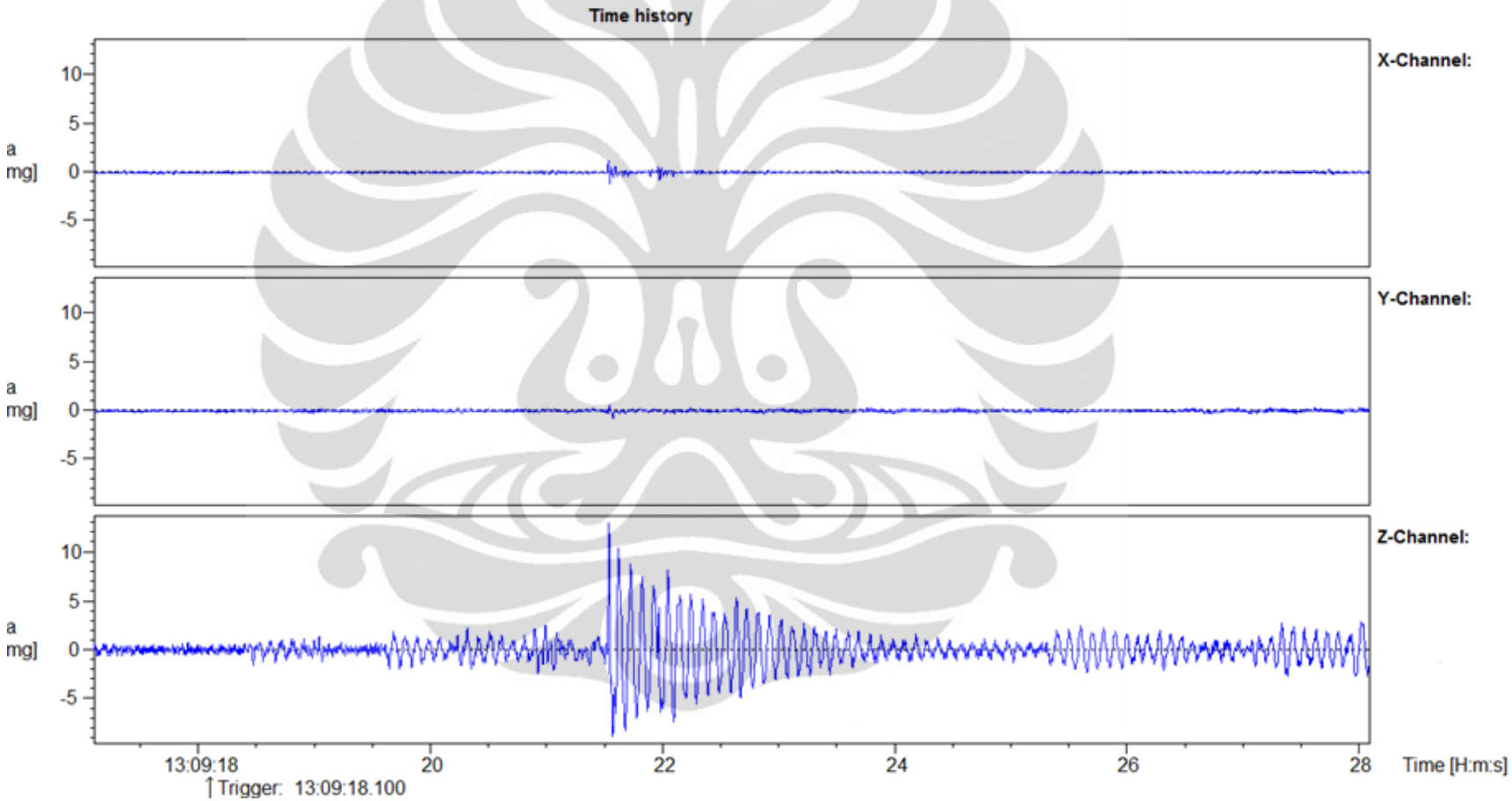
Respon Getaran Bebas Struktur (Pukulan *Hammer* Arah Z Posisi 1)



Respon Getaran Bebas Struktur (Pukulan *Hammer* Arah Z Posisi 2)

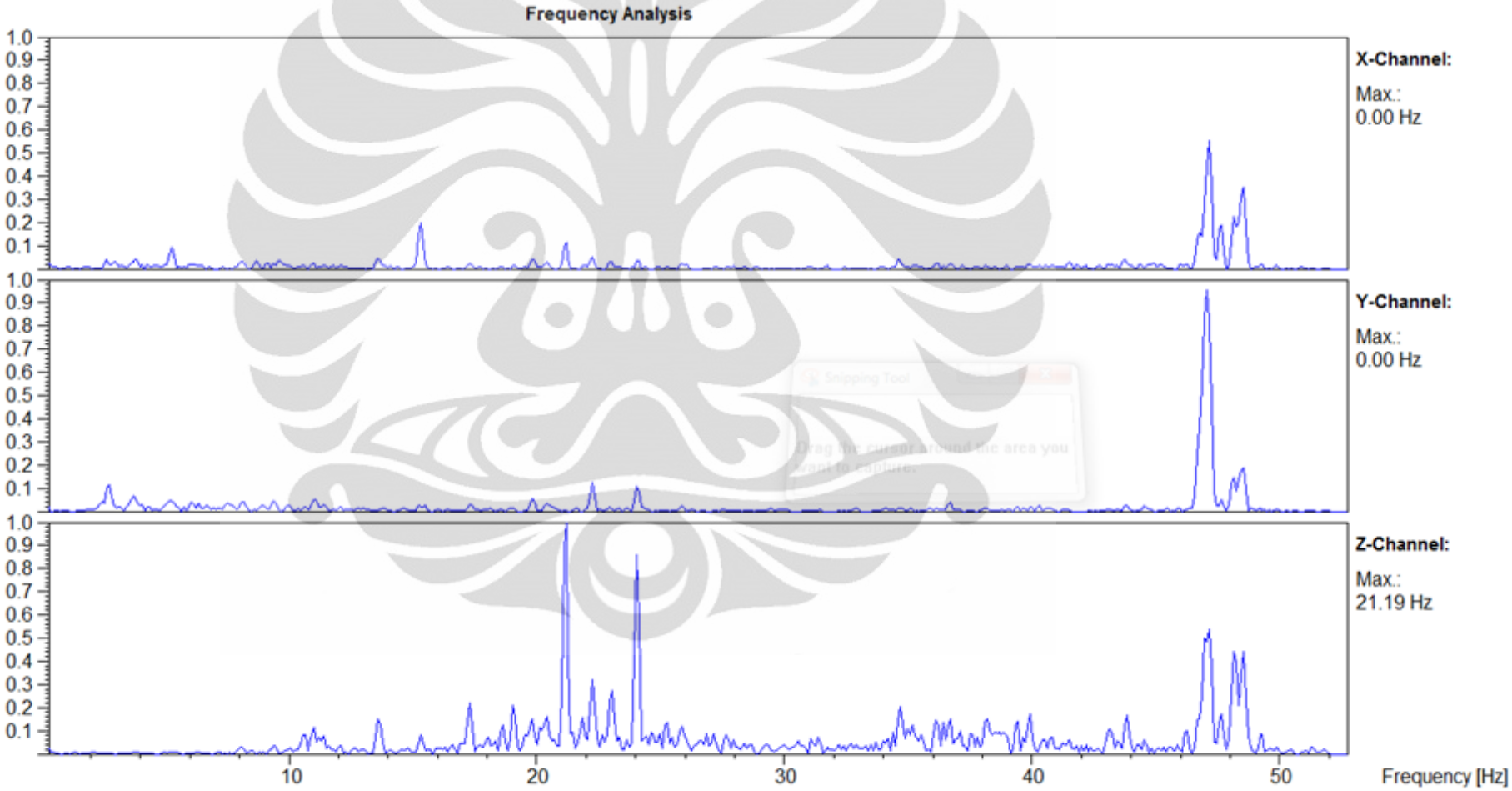


Respon Getaran Bebas Struktur (Lompatan)

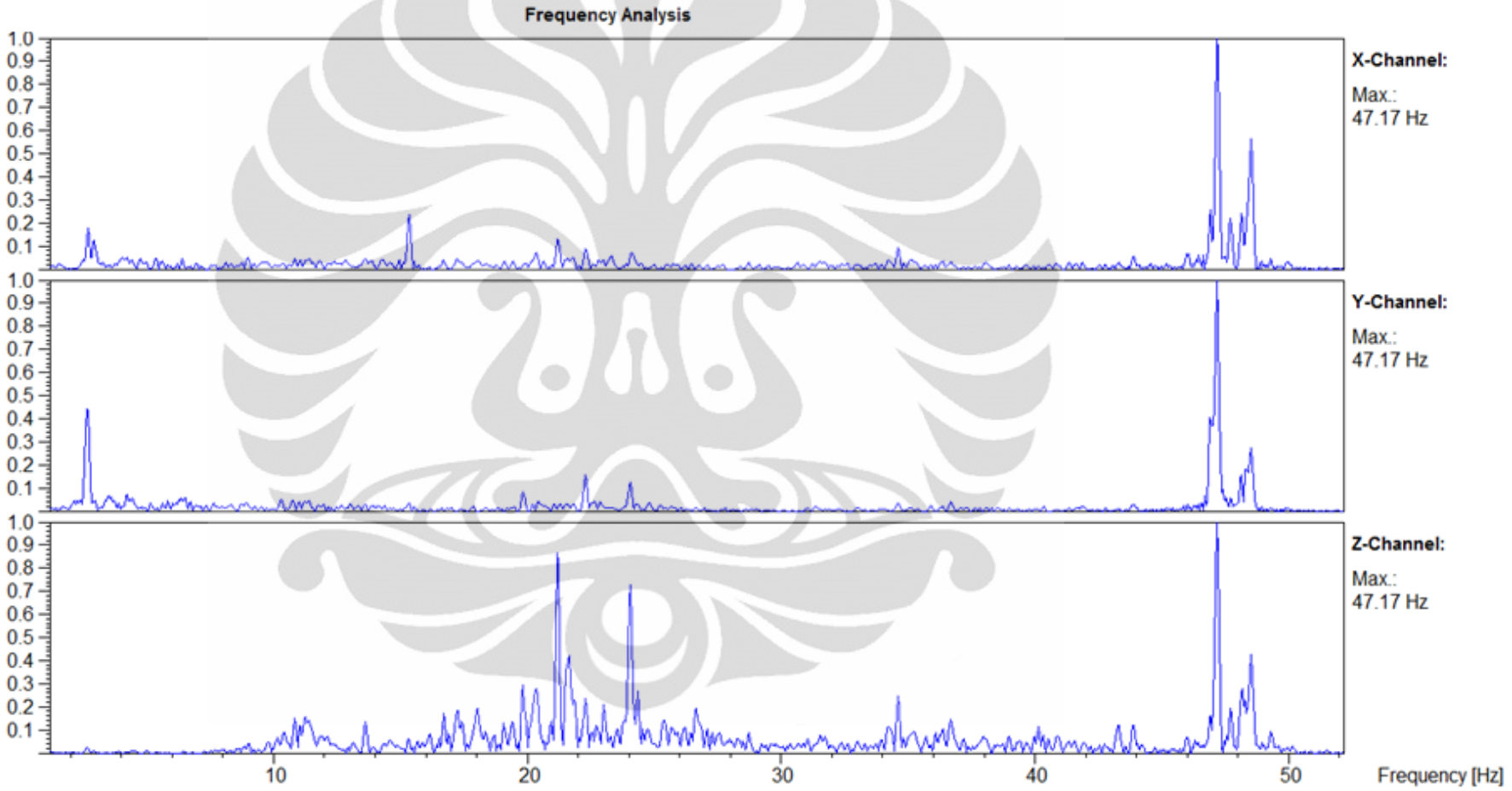


Lampiran D. Hasil FFT Respon Getaran Struktur

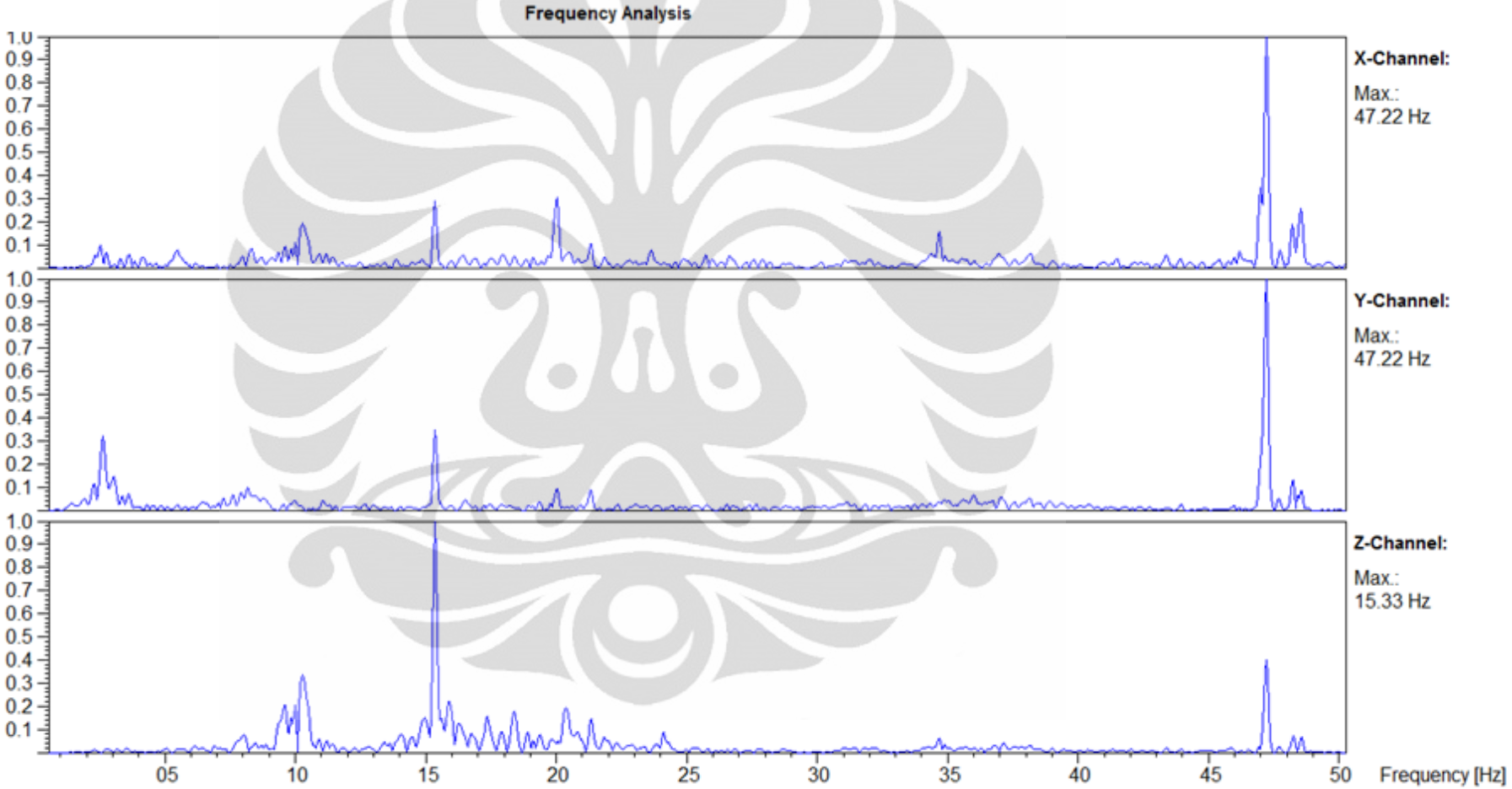
FRF Untuk Kondisi Tanpa Eksitasi



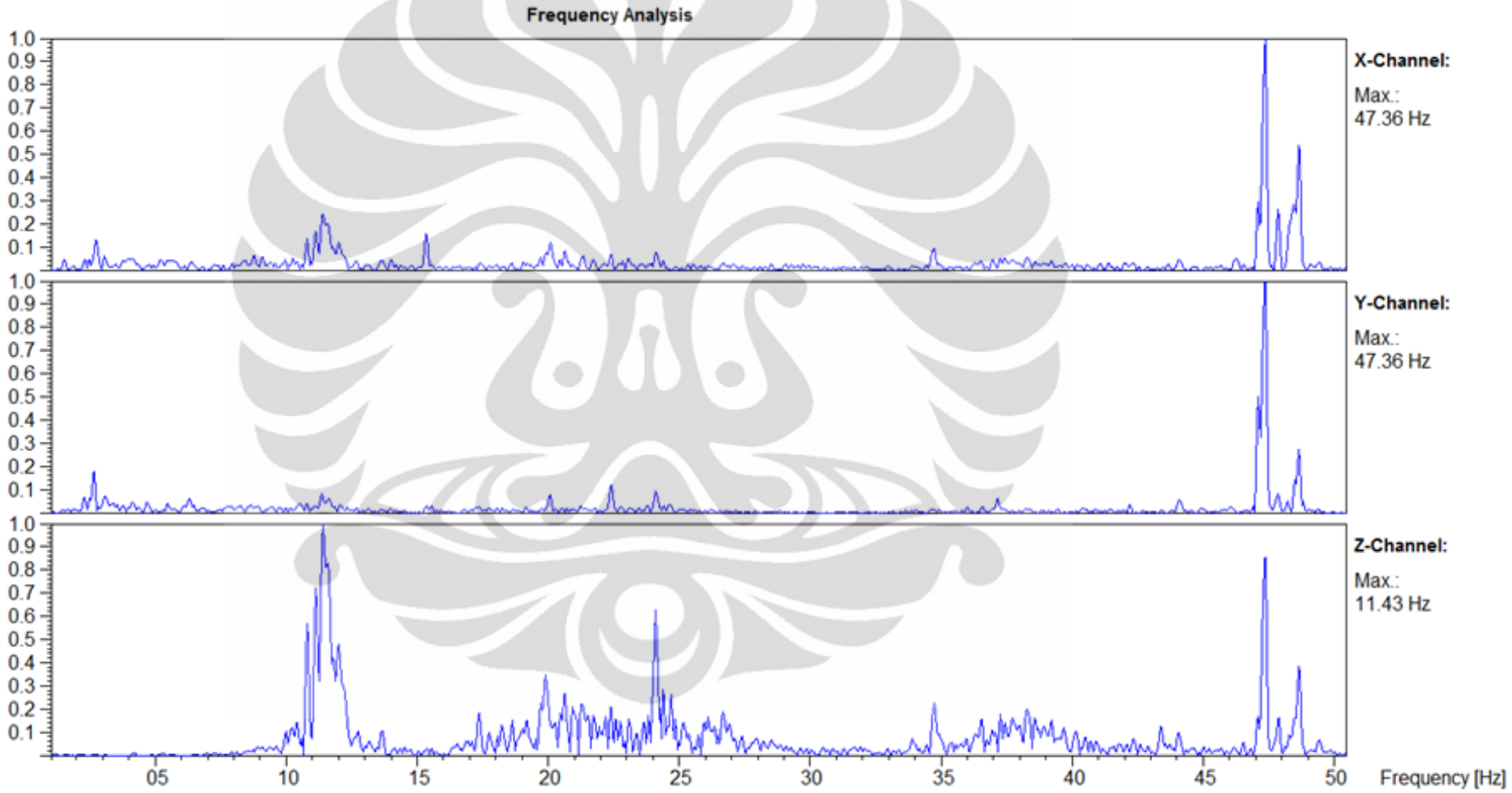
FRF Untuk Pukulan *Hammer* Arah X Posisi 1



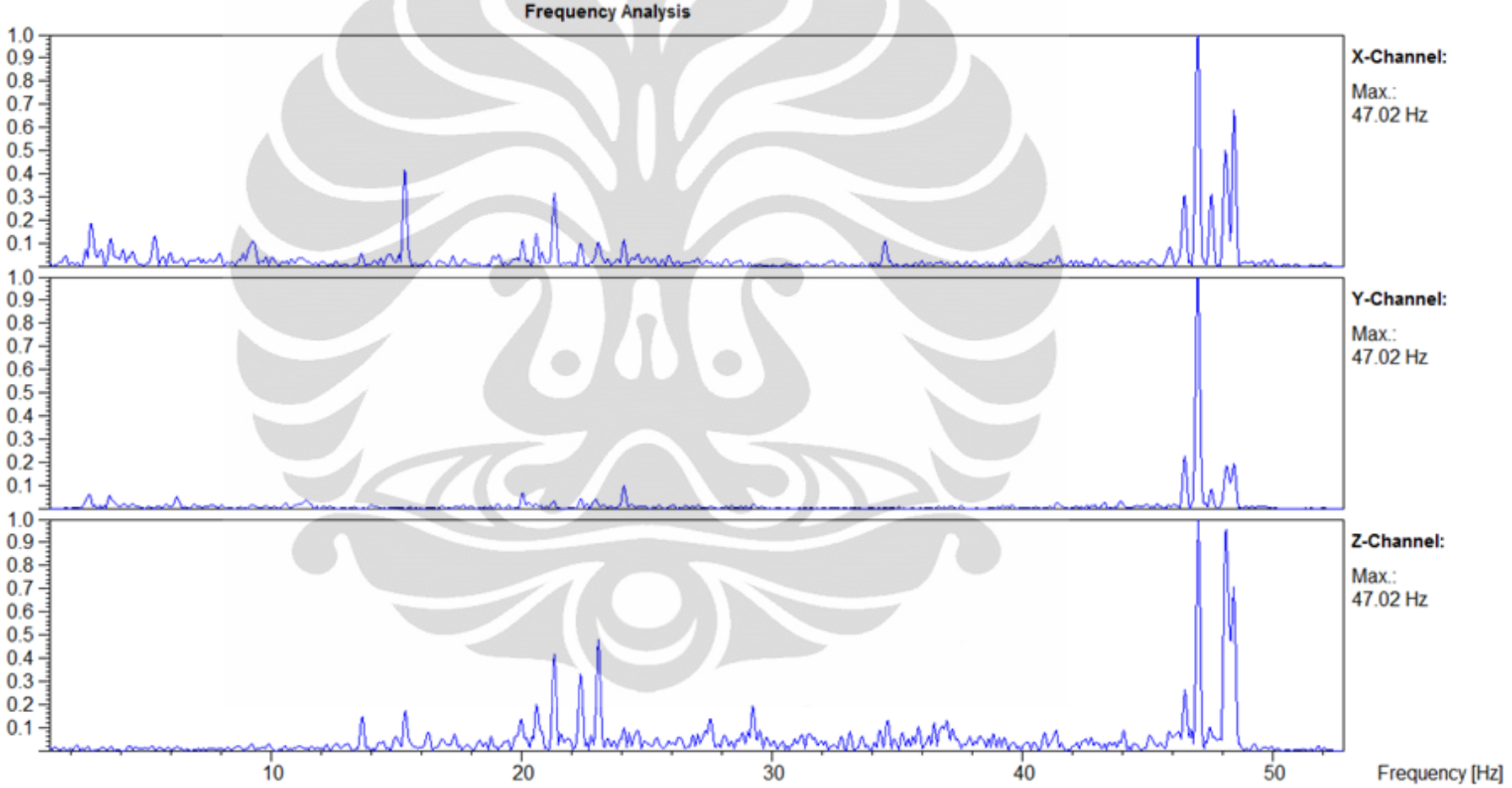
FRF Untuk Pukulan *Hammer* Arah X Posisi 2



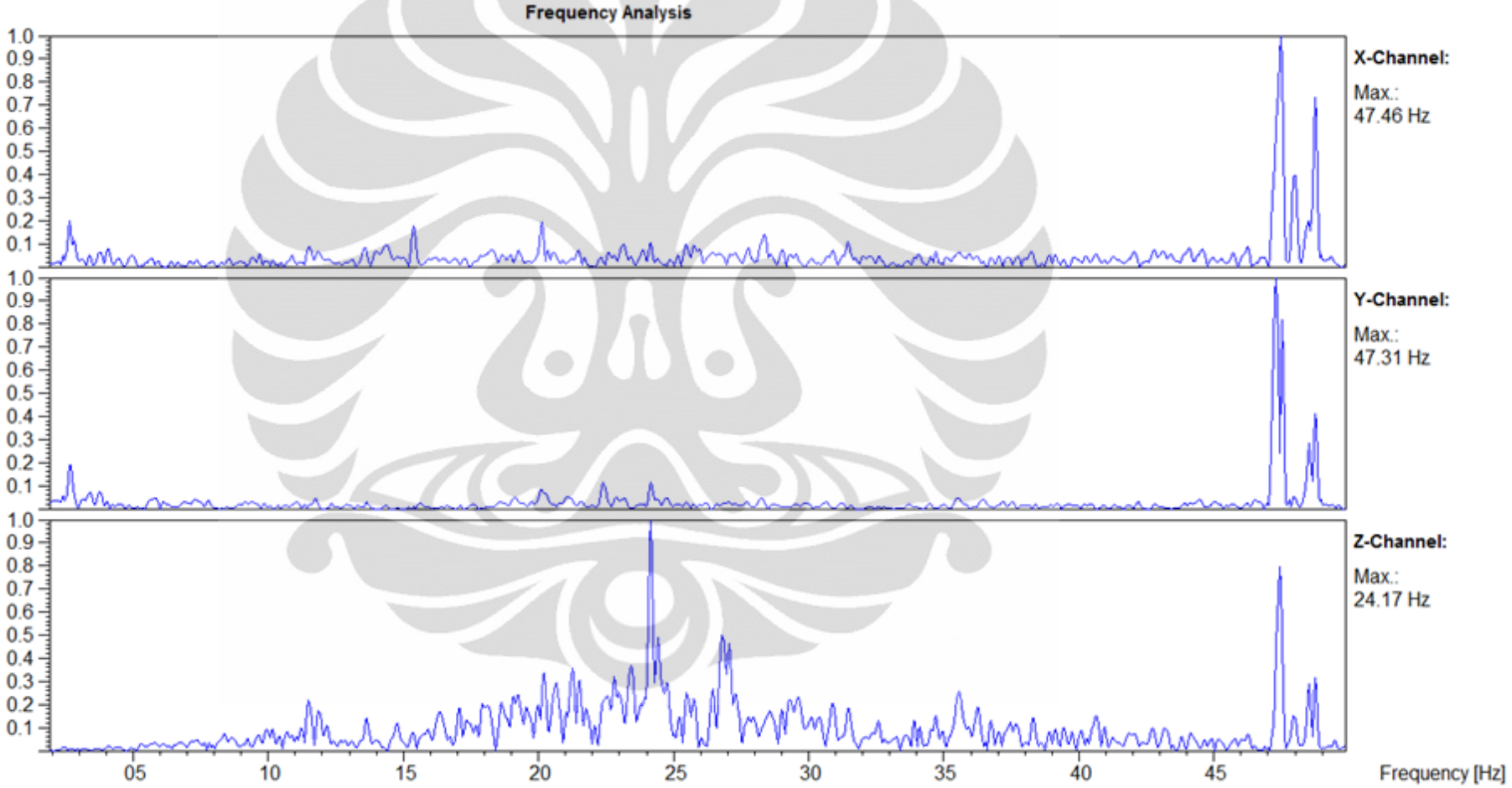
FRF Untuk Pukulan *Hammer* Arah Y Posisi 1



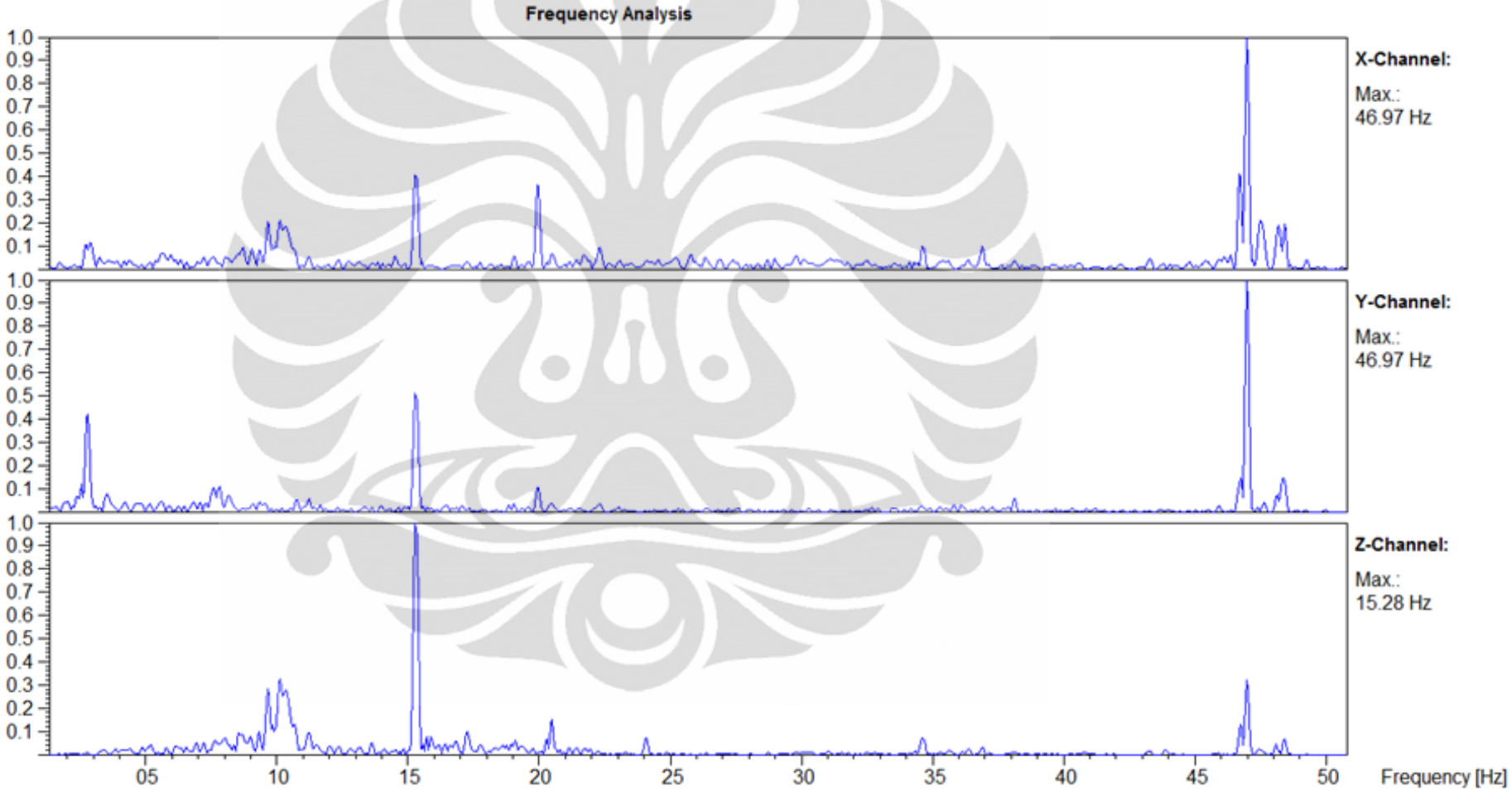
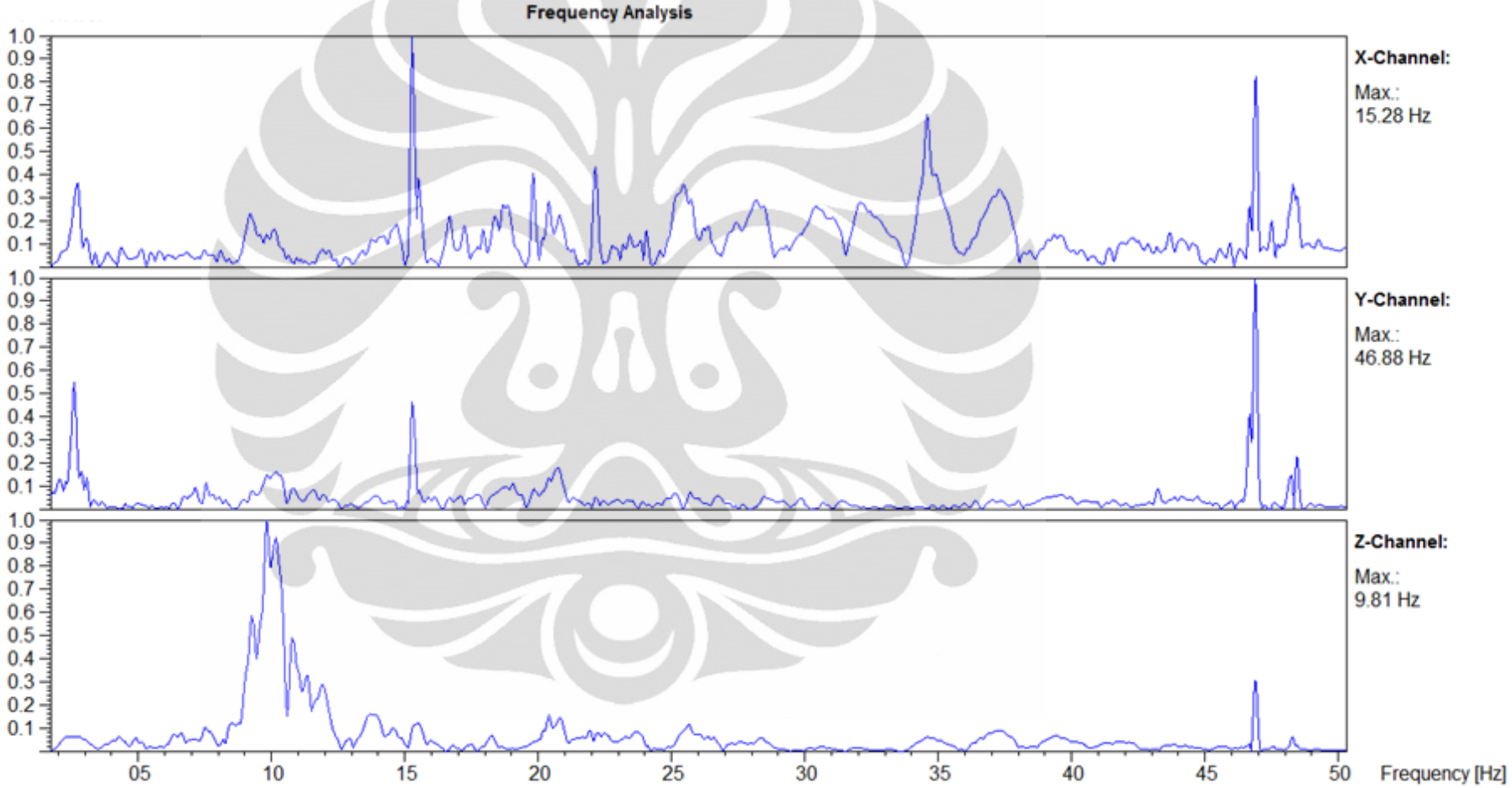
FRF Untuk Pukulan *Hammer* Arah Y Posisi 2



FRF Untuk Pukulan *Hammer* Arah Z Posisi 1



FRF Untuk Pukulan *Hammer* Arah Z Posisi 2



FRF Untuk Eksitasi Lompatan