



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

No.25/SKRIPSI/S.Tr-TKG/2024

SKRIPSI

**DETEKSI KERUSAKAN STRUKTUR GEDUNG
MENGUNAKAN *MODEL UPDATING* DENGAN
PENGUJIAN *OPERATIONAL MODAL ANALYSIS***



Disusun untuk melengkapi syarat kelulusan Program D4
Politeknik Negeri Jakarta

Disusun Oleh:

Hasby Akmal Almatiin

NIM 2001412030

Pembimbing

Dr. Anis Rosyidah, S.Pd., S.S.T., M.T.

NIP 197303181998022004

Jonathan Saputra, S.Pd., M.Si.

NIP 199111222019031010

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK KONSTRUKSI GEDUNG
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

2024

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul:

DETEKSI KERUSAKAN STRUKTUR GEDUNG MENGGUNAKAN *MODEL UPDATING* DENGAN PENGUJIAN *OPERATIONAL MODAL ANALYSIS* yang

disusun oleh **Hasby Akmal Almatiin (2001421030)** telah disetujui dosen pembimbing untuk dipertahankan dalam Sidang Skripsi

Pembimbing 1



Dr. Anis Rosyidah, S.Pd., S.S.T., M.T.
NIP 197303181998022004

Pembimbing 2






Jonathan Saputra, S.Pd., M.Si.
NIP 199111222019031010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi berjudul:

DETEKSI KERUSAKAN STRUKTUR GEDUNG MENGGUNAKAN *MODEL UPDATING* DENGAN PENGUJIAN *OPERATIONAL MODAL ANALYSIS* yang

disusun oleh **Hasby Akmal Almatiin (2001421030)** telah dipertahankan dalam
Sidang Skripsi di depan Tim Penguji pada hari *Jumat* tanggal
9 Agustus 2024

| | Nama Tim Penguji | Tanda Tangan |
|----------------|--|---|
| Ketua | Rinawati, S.T., M.T. NIP 197505102005012001 |  |
| Anggota | Mudiono Kasmuri, S.T., M.Eng., Ph.D. NIP 198012042020121001 |  |
| Anggota | Hendrian Budi Bagus K, S.T., M.Eng. NIP 198905272022031004 |  |

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Sipil
Politeknik Negeri Jakarta



Dr. Dyah Nurwidvaningrum, S.T., M.M., M.Ars.
NIP 197407061999032001



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : Hasby Akmal Almatiin
NIM : 2001421030
Prodi : D4 Teknik Konstruksi Gedung
Alamat Email : hasby.akmalalmatiin.ts20@mhs.w.pnj.ac.id
Judul Naskah : Deteksi Kerusakan Struktur Gedung Menggunakan *Model Updating* dengan Pengujian *Operational Modal Analysis*

Dengan ini saya menyatakan bahwa tulisan yang saya sertakan dalam Skripsi Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta Tahun Akademik 2023/2024 adalah benar-benar hasil karya saya sendiri, bukan jiplakan karya orang lain dan belum pernah diikutkan dalam segala bentuk kegiatan akademis.

Apabila dikemudian hari ternyata tulisan/naskah saya tidak sesuai dengan pernyataan ini, maka secara otomatis tulisan/naskah saya dianggap gugur dan bersedia menerima sanksi yang ada. Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya.

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Depok, 8 Agustus 2024
Yang menyatakan

Hasby Akmal Almatiin



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

KATA PENGANTAR

Puja dan puji syukur kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **DETEKSI KERUSAKAN STRUKTUR GEDUNG MENGGUNAKAN MODEL UPDATING DENGAN PENGUJIAN OPERATIONAL MODAL ANALYSIS** ini dengan baik dan tepat pada waktunya. Penyusunan skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk dapat menyelesaikan jenjang pendidikan Program Sarjana Terapan pada Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini tidak akan terwujud tanpa adanya do'a, usaha, motivasi, bantuan, bimbingan, dan kerjasama dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Teristimewa kepada keluarga penulis, Ayah Djuheri dan Mamah Epon Saripah selaku orangtua yang telah mengasuh dan mendidik dengan penuh cinta dan kasih sayang.
2. Ibu Dr. Anis Rosyidah, S.Pd., S.S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang senantiasa membimbing dan memberikan arahan terkait penelitian kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Jonathan Saputra, S.Pd., M.Si. selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa membimbing serta memberikan saran dan nasihat kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
4. Ibu Dr. Dyah Nurwidyaningrum, S.T., M.M., M.Ars. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta.
5. Bapak Mudiono Kasmuri, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Program Studi D4 Teknik Konstruksi Gedung.
6. Bapak Sidiq Wacono, S.T., M.T. selaku Pembimbing Akademik D4 Teknik Konstruksi Gedung.
7. Para dosen, tenaga kependidikan, serta staff administrasi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta.
8. Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Jakarta.
9. PT Testindo, khususnya kepada Bapak Zulfikri dan Bapak Qoiddul yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

10. Kepada teman-teman OTW Phuket dan teman-teman PKL Ciks yang telah memberikan dukungan, semangat, dan saran-saran terbaik.
11. Kepada teman-teman Teknik Sipil angkatan 2020 yang telah memberikan dukungan dan semangat.
12. Kepada teman-teman Teknik Elektro yang telah membantu dalam melakukan pengujian pada penelitian ini.
13. Semua teman-teman yang terlibat dan selalu mendukung penulis selama penulisan naskah skripsi ini.
14. *Last but not least, I want to thank myself for believing in me, for enduring all the hard work, for never giving up, and for simply being true to myself always.*

Penulis juga menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan juga saran yang membangun untuk menyempurnakan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat mencapai maksud dan tujuan dalam bidang keilmuan dan penelitian serta dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Depok, 8 Agustus 2024
Yang menyatakan

Hasby Akmal Almatiin



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----------|
| HALAMAN SAMPUL..... | i |
| HALAMAN PERSETUJUAN | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS..... | iv |
| ABSTRACT | v |
| ABSTRAK | vi |
| KATA PENGANTAR..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL | xii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiii |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. Latar Belakang Penelitian | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3. Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.4. Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.5. Sistematika Penulisan..... | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 4 |
| 2.1. Penelitian Terdahulu | 4 |
| 2.2. Parameter Dinamik..... | 7 |
| 2.3. <i>Optimal Sensor Placement (OSP)</i> | 8 |
| 2.4. <i>Operational Modal Analysis (OMA)</i> | 9 |
| 2.5. <i>Fast Fourier Transform (FFT) Analysis</i> | 10 |
| 2.6. <i>Finite Element (FE) Model Updating</i> | 11 |
| 2.7. Deteksi Kerusakan dengan Metode <i>Model Updating</i> | 12 |
| 2.8. Modulus Elastisitas Beton..... | 15 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 16 |
| 3.1. Gambaran Umum | 16 |
| 3.2. Lokasi Penelitian | 17 |
| 3.3. Objek Penelitian | 17 |
| 3.4. Alat Penelitian | 19 |



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

| | | |
|---|---|-----------|
| 3.5. | Tahapan Penelitian | 20 |
| 3.5.1. | Studi Literatur | 21 |
| 3.5.2. | Uji Coba Awal..... | 21 |
| 3.5.3. | Pengumpulan Data | 22 |
| 3.5.4. | Pemodelan FE Awal..... | 22 |
| 3.5.5. | Analisis Pengujian Awal | 22 |
| 3.5.6. | Pengujian Lapangan | 22 |
| 3.5.7. | FE Model Updating..... | 22 |
| 3.5.8. | Deteksi Kerusakan Struktur | 22 |
| 3.6. | Penggunaan Peraturan | 22 |
| 3.7. | Luaran..... | 23 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... | | 24 |
| 4.1. | Pemodelan Struktur Bangunan..... | 24 |
| 4.2. | Penentuan Lokasi dan Jumlah Sensor | 25 |
| 4.3. | Pengujian Struktur Bangunan..... | 27 |
| 4.3.1. | Persiapan dan Pengujian..... | 27 |
| 4.3.2. | Analisis Data Hasil Pengujian..... | 30 |
| 4.4. | FE Model Updating Struktur Bangunan | 31 |
| 4.5. | Deteksi Kerusakan Struktur Bangunan | 35 |
| 4.6. | Analisis Statistik..... | 45 |
| BAB V PENUTUP..... | | 46 |
| 5.1. | Kesimpulan..... | 46 |
| 5.2. | Saran..... | 46 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 47 |
| LAMPIRAN..... | | 52 |



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1 Hasil Deteksi Kerusakan pada Kasus Keempat..... | 4 |
| Gambar 2.2 Frekuensi Alami Shanghai Tower Berdasarkan Hasil AVT. | 5 |
| Gambar 2.3 Jembatan Pelengkung di Padova, Timur Laut Italia. | 6 |
| Gambar 2.4 Perkiraan Nilai Asli dari Enam Mode Getar Pertama UC San Diego Geisel Library..... | 7 |
| Gambar 2.5 Mode Getar 1, $t = 0.044s$, $f = 22.79Hz$ (a); Mode Getar 2, $t = 23.228s$, $f = 145.947Hz$ (b); Mode Getar 3, $t = 0.032s$, $f = 31.086Hz$ | 8 |
| Gambar 2.6 Perbandingan Mode Getar 1, Mode Getar 2, dan Mode Getar 3 serta Titik Penempatan Sensor Akselerometer..... | 9 |
| Gambar 2.7 Tahapan Operational Modal Analysis (OMA)..... | 9 |
| Gambar 2.8 Data Percepatan 30 Detik. | 10 |
| Gambar 2.9 Hasil FFT data percepatan. | 10 |
| Gambar 2.10 Tahapan FE Model Updating..... | 12 |
| Gambar 2.11 Konsep Dasar Deteksi Kerusakan dengan Model Updating..... | 13 |
| Gambar 2.12 Hasil Deteksi Kerusakan Struktur dengan Model Updating..... | 14 |
| Gambar 2.13 Kurva Tegangan-Regangan Beton..... | 15 |
| Gambar 3.1 Lokasi Penelitian..... | 17 |
| Gambar 3.2 Tampak Depan Gedung PUT PNJ..... | 17 |
| Gambar 3.3 3D Struktur Tampak Depan (a); Tampak Samping (b); Isometri (c).... | 18 |
| Gambar 3.4 Sensor Akselerometer..... | 19 |
| Gambar 3.5 Data Logger..... | 20 |
| Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian..... | 21 |
| Gambar 4.1 Denah Lokasi Sensor Lt. 2 (a), Denah Lokasi Sensor Lt. 3 (b), Denah Lokasi Sensor Lt. 4 (c), dan Denah Lokasi Sensor Lt. Atap (d)..... | 27 |
| Gambar 4.2 Lokasi Sensor pada Program ARTeMIS..... | 30 |
| Gambar 4.3 Visualisasi FRF Gedung PUT PNJ..... | 31 |
| Gambar 4.4 Matriks Perubahan Parameter..... | 32 |



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2. 1 Kriteria <i>Concrete Quality Designation</i> (CQD)..... | 14 |
| Tabel 3. 1 Data Teknis Struktur Gedung PUT PNJ | 18 |
| Tabel 4. 1 Bentuk Mode, Periode, dan Frekuensi..... | 24 |
| Tabel 4. 2 Simulasi Lokasi Sensor..... | 26 |
| Tabel 4. 3 Data Time Series Pengujian..... | 28 |
| Tabel 4. 4 Frekuensi Alami Teoritis dan OMA..... | 31 |
| Tabel 4. 5 Rangkuman Perubahan Parameter Modulus Elastisitas (E) Struktur | 32 |
| Tabel 4. 7 Peta Kontur dari Modulus Elastisitas Setiap Elemen | 35 |
| Tabel 4. 8 Rangkuman Nilai CQD Setiap Tipe Elemen | 42 |
| Tabel 4. 9 Uji t Sampel Berpasangan pada Model Awal dan Model yang Telah Diperbarui | 45 |





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|-----|
| LAMPIRAN 1 As Built Drawing | 53 |
| LAMPIRAN 2 Pembebanan | 88 |
| LAMPIRAN 3 Dokumentasi Pengujian | 90 |
| LAMPIRAN 4 Data Hasil Pengujian..... | 93 |
| LAMPIRAN 5 Data Hasil Model Updating | 100 |
| LAMPIRAN 6 Surat Permohonan Data Kelengkapan Tugas Akhir..... | 133 |
| LAMPIRAN 7 Formulir SI-1 Pernyataan Calon Pembimbing..... | 137 |
| LAMPIRAN 8 Formulir SI-2 Lembar Pengesahan | 140 |
| LAMPIRAN 9 Formulir SI-3 Lembar Asistensi..... | 142 |
| LAMPIRAN 10 Formulir SI-4 Persetujuan Pembimbing | 149 |
| LAMPIRAN 11 Formulir SI-5 Persetujuan Penguji..... | 154 |
| LAMPIRAN 12 Formulir SI-6 Kartu Kompensasi..... | 158 |
| LAMPIRAN 13 Formulir SI-7 Lembar Bebas Pinjaman dan Urusan Administrasi | 160 |
| LAMPIRAN 14 Formulir MI-9 Bukti Penyerahan Laporan Magang Industri..... | 162 |

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Penelitian

Seringkali terdapat perbedaan antara rencana awal dan pelaksanaan ketika membangun suatu bangunan. Perbedaan ini dapat mencakup penggunaan material yang tidak sesuai, variasi dalam penulangan, sistem sambungan yang berbeda, serta perubahan desain yang tidak dikonfirmasi atau terdokumentasi dengan baik. Faktor-faktor ini dapat memengaruhi keandalan struktur tersebut (Stanojevic & Stojic, 2014). Sehingga untuk memastikan keandalan struktur maka perlu dilakukan pengujian bangunan eksisting (Potrzyszcz-Sut & Dudzik, 2022).

Pengujian dinamik berbasis getaran (*ambient vibration test*) merupakan salah satu metode untuk memperoleh kondisi aktual keandalan struktur (Anjneya & Roy, 2021; Sun et al., 2023). Pengujian ini dapat memperkirakan parameter modal dari struktur (W. Chen et al., 2021). Parameter modal yang umum digunakan untuk menggambarkan perilaku dinamik dari struktur adalah frekuensi, rasio redaman, dan bentuk mode getar (Kouris et al., 2019; Tronci et al., 2020). Analisis terhadap parameter-parameter ini dapat mengungkap bagaimana struktur memberikan respon terhadap gaya eksternal seperti beban gempa dan beban angin (J. Chen & Cho, 2022). Parameter modal juga dapat berubah secara signifikan akibat kerusakan struktur, sehingga kerusakan struktur dapat dideteksi melalui perubahan ini (Anjneya & Roy, 2021; Betit, 2021).

Operational Modal Analysis (OMA) merupakan metode yang digunakan dalam memperkirakan parameter modal suatu struktur berdasarkan getaran dari kondisi operasional bangunan (Biondini & Frangopol, 2016; Ghalishooyan & Shooshtari, 2015). Data yang dikumpulkan dalam pengujian OMA adalah data getaran yang diukur menggunakan sensor akselerometer. Pengujian OMA telah diterapkan pada jembatan (Anastasopoulos et al., 2021; Gennaro et al., 2022; Hwang et al., 2020), gedung (Pan et al., 2020; Sun et al., 2023), bendungan (Guo et al., 2023; Pereira et al., 2021).

Finite element (FE) *model updating* adalah prosedur yang bertujuan untuk memperbarui model FE suatu struktur agar sesuai dengan hasil numerik dan eksperimen (Girardi et al., 2020). Dalam struktur yang telah dimodelkan dengan FE,



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

kerusakan dapat mengubah respons struktur, menghasilkan perbedaan antara model FE awal dan model FE yang telah diperbarui. Perbedaan antara parameter struktural model FE dan struktur yang mengalami kerusakan dapat diamati melalui penyimpangan antara keduanya. Dengan demikian, model yang telah diperbarui mampu memberikan prediksi yang lebih akurat terhadap respons struktural, termasuk kerusakan lokal atau mode getaran pada elemen struktural dan non-struktural (Alkayem et al., 2018; Angjeliu et al., 2020).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan FE *model updating* pada bangunan gedung bertingkat menengah, dengan Gedung Laboratorium Terpadu Pusat Unggulan Teknologi (PUT) Politeknik Negeri Jakarta (PNJ) sebagai studi kasus. Melalui penelitian ini, peneliti berharap akan memberikan sudut pandang baru dalam melakukan deteksi kerusakan struktur pada bangunan gedung eksisting.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana frekuensi alami bangunan gedung berdasarkan pengujian *Operational Modal Analysis* (OMA)?
2. Bagaimana persentase perbedaan frekuensi alami bangunan gedung berdasarkan pengujian *Operational Modal Analysis* (OMA) terhadap model FE awal?
3. Bagaimana hasil deteksi kerusakan struktur bangunan gedung dengan *model updating*?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui frekuensi alami bangunan gedung berdasarkan pengujian *Operational Modal Analysis* (OMA).
2. Membandingkan persentase perbedaan frekuensi alami bangunan gedung berdasarkan pengujian *Operational Modal Analysis* (OMA) terhadap model FE awal.
3. Melakukan deteksi kerusakan struktur bangunan gedung dengan *model updating*.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.4. Batasan Masalah

Pembatasan masalah dalam penelitian ini bertujuan untuk memberikan arahan dan upaya agar masalah tidak menjadi meluas. Adapun batasan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Analisis penelitian hanya dilakukan untuk struktur atas bangunan gedung.
2. Sensor yang digunakan adalah sensor akselerometer.
3. Pengujian struktur bangunan menggunakan metode *Operational Modal Analysis* (OMA) pada jam perkuliahan.
4. Pemodelan struktur, OMA, dan *model updating* menggunakan bantuan program SAP2000, ARTEMIS, dan FEMtools.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun berdasarkan pedoman skripsi. Adapun sistematika yang digunakan terdiri dari 5 (lima) bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang dalam penulisan, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tentang penelitian terdahulu serta pembahasan mengenai *Optimal Sensor Placement* (OSP), *Operational Modal Analysis* (OMA), *Fast Fourier Transform* (FFT) analysis, *bayesian Finite Element* (FE) *model updating*, dan deteksi kerusakan dengan metode *model updating*.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini terdiri atas gambaran umum penelitian, rancangan penelitian, objek penelitian, tahapan penelitian, penggunaan peraturan, dan luaran penelitian.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data-data yang digunakan dalam penelitian, kajian dari data-data penelitian, serta pembahasan dari hasil analisis dan pengujian yang didapatkan.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian yang didapatkan disertai dengan saran untuk penelitian selanjutnya.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

1. Hasil pengujian *Operational Modal Analysis* (OMA) menunjukkan bahwa frekuensi alami yang diperoleh adalah sebesar 0,898Hz, 1,641Hz, 2,754Hz, 3,574Hz, 3,965Hz, dan 4,492Hz.
2. Persentase perbedaan frekuensi alami gedung berdasarkan pengujian *Operational Modal Analysis* (OMA) terhadap model FE awal adalah 30,33% untuk mode pertama, 15,81% untuk mode kedua, 72,77% untuk mode ketiga, 10,83% untuk mode keempat, 6,88% untuk mode kelima, dan 8,48% untuk mode keenam, dengan perbedaan frekuensi berkisar antara 6,88% - 72,77%. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi perbedaan frekuensi ini meliputi kondisi antara beban rencana dengan beban aktual yang berbeda, faktor pelaksanaan, keberadaan dinding, dan perubahan suhu bangunan.
3. Hasil analisis menunjukkan bahwa semua elemen struktur, berdasarkan *Concrete Quality Designation* (CQD) terhadap perubahan modulus elastisitas beton 30,18% elemen berada pada kondisi sangat baik (*excellent*) dan 69,82% elemen berada pada kondisi baik (*good*). Sehingga tidak ada elemen struktur yang mengalami kerusakan. Kemudian berdasarkan hasil uji statistika, pembaruan yang dilakukan pada model menunjukkan dampak yang signifikan terhadap perubahan modulus elastisitas.

5.2. Saran

1. Pengujian OMA dapat ditingkatkan dengan penambahan lokasi sensor akselerometer untuk memperoleh data yang lebih mendetail dan komprehensif.
2. Untuk memahami lebih lanjut faktor-faktor yang mempengaruhi perbedaan frekuensi, perlu dilakukan monitoring kesehatan struktur dengan memasang sensor akselerometer dan sensor lainnya secara kontinu.
3. Deteksi kerusakan struktur dengan FE model updating bisa diterapkan pada berbagai struktur seperti jembatan, bendungan, bangunan bersejarah, dan bangunan sebelum serta sesudah dilakukan perbaikan. Hasil dari FE model updating juga dapat digunakan untuk menguji kinerja struktur bangunan pada kondisi aktual.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- Alkayem, N. F., Cao, M., Zhang, Y., Bayat, M., & Su, Z. (2018). Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey. In *Neural Computing and Applications* (Vol. 30, Nomor 2, hal. 389–411). Springer London. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3284-1>
- Almomani, Y., Tarawneh, A., Alawadi, R., Taqieddin, Z. N., Taha, S., Abu Sheikh, N., & Momani, Z. (2023). Confinement model for circular concrete columns transversely reinforced with GFRP spirals and hoops. *Results in Engineering*, 17, 100918. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100918>
- Anastasopoulos, D., De Roeck, G., & Reynders, E. P. B. (2021). One-year operational modal analysis of a steel bridge from high-resolution macrostrain monitoring: Influence of temperature vs. retrofitting. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.107951>
- Angjeliu, G., Coronelli, D., & Cardani, G. (2020). Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality. *Computers and Structures*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106282>
- Anjneya, K., & Roy, K. (2021). Response surface-based structural damage identification using dynamic responses. *Structures*, 29, 1047–1058. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.033>
- Araki, Y., Arjomandi, K., & Simpson, R. (2017). Ambient vibration testing of the hawshaw bridge. *IABSE Conference, Vancouver 2017: Engineering the Future - Report*, 109, 1973–1980. <https://doi.org/10.2749/vancouver.2017.1973>
- Aruya, G. A., & Chukwuemezie, V. K. (2022). *Causes of Cracks on Concrete Structures and Repair Methods*. September 2022, 1–11. www.ijlera.com
- Asadollahi, P., Huang, Y., & Li, J. (2018). Bayesian finite element model updating and assessment of cable-stayed bridges using wireless sensor data. *Sensors (Switzerland)*, 18(9). <https://doi.org/10.3390/s18093057>
- Asghar, R., Khan, M. A., Alyousef, R., Javed, M. F., & Ali, M. (2023). Promoting the green Construction: Scientometric review on the mechanical and structural performance of geopolymers concrete. *Construction and Building Materials*, 368(January), 130502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130502>
- Azucena, J., Wang, H., Jin, Y., & Liao, H. (2022). Modeling and analysis of two Normal populations based on an unlabeled paired sample. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/03610918.2022.2134895>
- Betit, B. A. (2021). *Experimental and Analytical Assessment on the Progressive Collapse Potential of a Reinforced Concrete Building* [The Ohio State University]. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1637592099747652
- Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2016). Life-Cycle Performance of Deteriorating Structural Systems under Uncertainty: Review. *Journal of Structural Engineering*, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001544](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001544)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Brincker, R., & Ventura, C. E. (2015). Front Matter. In *Introduction to Operational Modal Analysis*. <https://doi.org/10.1002/9781118535141.fmatter>
- Chen, J., & Cho, Y. K. (2022). CrackEmbed: Point feature embedding for crack segmentation from disaster site point clouds with anomaly detection. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101550>
- Chen, W., Jin, M., Huang, J., Chen, Y., & Song, H. (2021). A method to distinguish harmonic frequencies and remove the harmonic effect in operational modal analysis of rotating structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.107928>
- Eswaran, M., Parulekar, Y. M., & Reddy, G. R. (2019). Introduction to Structural Dynamics and Vibration of Single-Degree-of-Freedom Systems. In *Textbook of Seismic Design* (hal. 61–93). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3176-3_3
- Fritzen, C. P., Jennewein, D., & Kiefer, T. (1998). Damage detection based on model updating methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12(1), 163–186. <https://doi.org/10.1006/mssp.1997.0139>
- Gennaro, A., Caprino, A., Pernechele, V., Lorenzoni, F., & da Porto, F. (2022). In-situ test and model updating of an RC tied-arch bridge. *Procedia Structural Integrity*, 44, 822–829. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.107>
- Gentile, C., Guidobaldi, M., & Saisi, A. (2016). One-year dynamic monitoring of a historic tower: damage detection under changing environment. *Meccanica*, 51(11), 2873–2889. <https://doi.org/10.1007/s11012-016-0482-3>
- Ghalishooyan, M., & Shooshtari, A. (2015). Operational modal analysis techniques and their theoretical and practical aspects: A comprehensive review and introduction. *6th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2015*. <https://www.researchgate.net/publication/281786721>
- Girardi, M., Padovani, C., Pellegrini, D., Porcelli, M., & Robol, L. (2020). Finite element model updating for structural applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 370. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.112675>
- Gkoktsi, K., Tirelli, D., Bono, F., Huguet, M., Renaldi, G., & Vaglica, G. (2020). *MITICA Experimental Testing : Instrumentation and Signal Processing Using the Fast Hammer Impact Testing Method*. <https://doi.org/10.2760/51069>
- Guo, X., Dufour, F., & Humbert, N. (2023). Ambient Vibration Data-Based Modal Parameter Estimation and Numerical Model Calibration of an Arch Dam. In M. P. Limongelli, P. F. Giordano, S. Quqa, C. Gentile, & A. Cigada (Ed.), *Lecture Notes in Civil Engineering: Vol. 432 LNCE* (hal. 252–262). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_26
- Hou, R., & Xia, Y. (2021). Review on the new development of vibration-based damage identification for civil engineering structures: 2010–2019. In *Journal of Sound and Vibration* (Vol. 491, hal. 115741). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115741>
- Hu, R. P., Xu, Y. L., & Zhan, S. (2018). Multi-type sensor placement and response



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

reconstruction for building structures: Experimental investigations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 17(1), 29–46. <https://doi.org/10.1007/s11803-018-0423-3>

Hwang, Y. C., Kim, S., & Kim, H. K. (2020). Cause investigation of high-mode vortex-induced vibration in a long-span suspension bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(1), 84–93. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1604771>

Kent student, C., Bunce student, A., Hester, D., Taylor Professor, S., & Wood, R. (2023). *Uncertainty in bridge mode shapes based on accelerometer location*. <http://hdl.handle.net/2262/103668http://go.qub.ac.uk/oa-feedback>

Kouris, L. A. S., Penna, A., & Magenes, G. (2019). Dynamic Modification and Damage Propagation of a Two-Storey Full-Scale Masonry Building. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2396452>

Kovler, K., & Chernov, V. (2009). Types of damage in concrete structures. In *Failure, Distress and Repair of Concrete Structures* (hal. 32–56). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9781845697037.1.32>

Leyder, C., Dertimanis, V., Frangi, A., Chatzi, E., & Lombaert, G. (2018). Optimal sensor placement methods and metrics—comparison and implementation on a timber frame structure. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(7), 997–1010. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1438483>

Lin, Y. zhou, Nie, Z. hua, & Ma, H. wei. (2022). Dynamics-based cross-domain structural damage detection through deep transfer learning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37(1), 24–54. <https://doi.org/10.1111/mice.12692>

Lo, S. H., Li, L., & Su, R. K. L. (2014). Optimization of partial interaction in bolted side-plated reinforced concrete beams. *Computers and Structures*, 131(January), 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.10.007>

Mahjoubi, S., Barhemat, R., & Bao, Y. (2020). Optimal placement of triaxial accelerometers using hypotrochoid spiral optimization algorithm for automated monitoring of high-rise buildings. *Automation in Construction*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103273>

Mahrouqi, M. (2022). Progressive Collapse Testing and Analysis of a Parking Garage. In *The Ohio State University*.

Pan, Y., Ventura, C. E., Xiong, H., & Zhang, F. L. (2020). Model updating and seismic response of a super tall building in Shanghai. *Computers and Structures*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106285>

Paulík, P., Bačuvčík, M., Ševčík, P., Janotka, I., & Gajdošová, K. (2016). Experimental Evaluation of Properties of 120 Years Old Concretes at Two Concrete Bridges in Slovakia. *Solid State Phenomena*, 249 SSP(6), 227–234. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.249.227>

Pereira, S., Magalhães, F., Gomes, J. P., Cunha, Á., & Lemos, J. V. (2021). Vibration-based damage detection of a concrete arch dam. *Engineering Structures*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112032>



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Perrone, D., Leone, M., & Aiello, M. A. (2017). Non-linear behaviour of masonry infilled RC frames: Influence of masonry mechanical properties. *Engineering Structures*, 150, 875–891. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.001>
- Potrzeszcz-Sut, B., & Dudzik, A. (2022). Three Methods in Reliability Assessment of Engineering Structure. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 11(3), 114–118. <https://doi.org/10.35940/ijeat.c3386.0211322>
- Providakis, C. P., Moustera, M. G., & Providaki, G. C. (2023). Operational Modal Analysis of Historical Buildings and Finite Element Model Updating Using α Laser Scanning Vibrometer. *Infrastructures*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/infrastructures8020037>
- Qing Li, C. (2004). Reliability Based Service Life Prediction of Corrosion Affected Concrete Structures. *Journal of Structural Engineering*, 130(10), 1570–1577. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2004\)130:10\(1570\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:10(1570))
- Qoiddul Adli., M. K. (2023). Penentuan Nilai frekuensi Alami Struktur Pelat Lantai Jembatan Lengkung Menggunakan Metode Operational Modal Analysis (OMA). *International Journal of Technology*, 47(1), 100950. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.01.002><https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.100950><https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.04.007><https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102816><https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.015><https://doi.org/10.1016/j>
- Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications*.
- Safrudin, A. T., Siswosukarto, S., & Suhendro, B. (2023). Analisis Derajat Kerusakan dan Penurunan Modulus Elastisitas Material Cement Treated Base (CTB) menggunakan UPV test dan Concrete Quality Designation (CQD). *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 21(4), 405–414.
- Saidou Sanda, M., Gauron, O., Turcotte, N., Lamarche, C. P., Paultre, P., Talbot, M., & Laflamme, J. F. (2018). Efficient finite elements model updating for damage detection in bridges. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 5, hal. 293–305). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67443-8_25
- Santos, J. P., Cr mona, C., Calado, L., Silveira, P., & Orcesi, A. D. (2016). On-line unsupervised detection of early damage. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(7), 1047–1069. <https://doi.org/10.1002/stc.1825>
- Stanojev, M., & Stojic, D. (2014). Reliability analysis of structures. *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, 12(3), 265–272. <https://doi.org/10.2298/fuace1403265s>
- Str mmer, E. N. (2014). *Structural Dynamics*.
- Sun, L., Conte, J. P., Todd, M. D., Restrepo, J. I., Astroza, R., Bock, Y., Offield, G., & Vernon, F. (2023). Linear System Identification of the UC San Diego Geisel Library Building. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 433 LNCE, 61–70. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39117-0_7
- Tronci, E. M., De Angelis, M., Betti, R., & Altomare, V. (2020). Vibration-based structural health monitoring of a RC-masonry tower equipped with non-



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

conventional TMD. *Engineering Structures*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111212>

Türker, T., Bayraktar, A., & Sevim, B. (2014). Vibration based damage identification of concrete arch dams by finite element model updating. *Computers and Concrete*, 13(2), 209–220. <https://doi.org/10.12989/cac.2014.13.2.209>

Wang, Y. (2020). *Vibration Signal Extraction Based on FFT and Least Square Method*. 8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044149>

Yu, Z., Huang, Q., Xie, X., & Xiao, N. (2018). Experimental study and failure criterion analysis of plain concrete under combined compression-shear stress. *Construction and Building Materials*, 179, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.242>

Zahid, F. Bin, Ong, Z. C., & Khoo, S. Y. (2020). A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification. In *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (Vol. 42, Nomor 8). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02470-8>

