

**TESIS**  
**OPTIMASI NUMERIK UNTUK KALIBRASI KEKAKUAN**  
**LATERAL ANTAR TINGKAT PADA PORTAL BETON**  
**BERTULANG**



CAETANO JOSÉ FREITAS

NPM: 245119919

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA  
2026



**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA**  
**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL**

---

**PERSETUJUAN TESIS**

Nama : Caetano José Freitas  
Nomor Mahasiswa : 245119919  
Konsentrasi : Struktur  
Judul Tesis : Optimasi Numerik Untuk Kalibrasi Kekakuan Lateral  
Antar Tingkat Pada Portal Beton Bertulang

**Dosen Pembimbing**

**Tanggal**

**Tanda tangan**

Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D

15/04/2026



**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA**  
**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL**

---

**PENGESAHAN TESIS**

Nama : Caetano José Freitas  
Nomor Mahasiswa : 245119919  
Konsentrasi : Struktur  
Judul Tesis : Optimasi Numerik Untuk Kalibrasi Kekakuan  
Lateral Antar Tingkat Pada Portal Beton Bertulang

**Dosen Pembimbing**

**Tanggal**

**Tanda Tangan**

Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D

15/04/2026

Prof. Dr. Ir. AM. Ade Lisantono, M.Eng.,  
IPU, ASEAN Eng

15/01/2026

Dr. Ir. Januar Sudjati, S.T., M.T.

15/1-26



Mengetahui,

Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil

Dr. Ir. Nectaria Putri Pramesti, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.

## PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan dengan sungguh-sungguh bahwa tesis dengan judul:

**OPTIMASI NUMERIK UNTUK KALIBRASI KEKAKUAN LATERAL ANTAR TINGKAT PADA PORTAL BETON BERTULANG.**

Benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri dan bukan merupakan hasil plagiasi dari karya orang lain. Ide, data hasil penelitian maupun kutipan baik langsung maupun tidak langsung yang bersumber dari tulisan atau ide orang lain dinyatakan secara tertulis dalam tesis ini. Apabila terbukti dikemudian hari bahwa tesis ini merupakan hasil plagiasi, maka ijazah yang saya peroleh dinyatakan batal dan saya akan kembalikan kepada Rektor Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Yogyakarta, ..... Januari 2026

Yang membuat pernyataan

  
(Caetano José Freitas)

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kepada Allah Yang Maha Kuasa. Bapa, Putera dan Roh Kudus. Atas segala rahmat, berkat, dan kasih karunia yang diberikan bersama doa Bunda Maria yang turut menyertai sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Tesis ini ditujukan untuk memenuhi sebagian persyaratan akademik guna memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Penyusunan Tesis ini dapat diselesaikan berkat bantuan serta dukungan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu ucapan terima kasih disampaikan kepada:

1. Dr. Ir. Nectaria Putri Pramesti, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
2. Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D selaku Dosen Pembimbing, atas arahan dan bimbingannya selama proses penyusunan Tesis.
3. Prof. Dr. Ir. AM. Ade Lisantono, M.Eng., IPU, ASEAN Eng dan Dr. Ir. Januar Sudjati, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji, atas masukan dan saran sehingga penyusunan maupun isi dari Tesis ini menjadi lebih baik.
4. Segenap Dosen pada Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta yang telah bersedia mendidik, mengajar, dan berbagi ilmu selama masa perkuliahan.
5. Staff Administrasi pada Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta yang telah bersedia melayani dan membantu selama masa perkuliahan.
6. Program Kemitraan Negara Berkembang (KNB *Scholarship*) yang telah memberikan kesempatan, dukungan, dan beasiswa sehingga penulis dapat menempuh dan menyelesaikan studi Magister Teknik Sipil di Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

7. Orang - orang tercinta, Terutama Bapak, Mama (RIP), Istri Fernanda Ximenes Lourdes, Anak-anak saya (Agni, Febna, dan Roby), dan Kakak Alzira, atas doa dan dukungan, serta motivasi yang tiada henti.
8. Keluarga besar Bahaboba yang senantiasa memberikan dukungan moral, doa, serta kekuatan adat dan budaya yang menjadi landasan dalam setiap langkah saya. Terima kasih atas kasih sayang, kebersamaan, dan nilai-nilai luhur yang selalu menguatkan penulis selama menjalani proses studi ini.
9. Teman-teman seperjuangan MTS24, terutama teman sebangkuan yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan semangat agar bisa lulus bersama.
10. Kepada teman-teman dari Timor-Leste di Yogyakarta (STELAR) terutama di Atma Jaya serta rekan-rekan penerima beasiswa dari berbagai negara yang satu angkatan dengan penulis, terima kasih atas kebersamaan, dukungan, kerja sama, dan semangat saling membantu yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan studi ini. Kehadiran kalian menjadikan proses pembelajaran lebih bermakna dan penuh inspirasi.
11. Serta pihak-pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, baik yang secara langsung maupun tidak langsung membantu penulis dalam menyelesaikan studi di Magister Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan tesis ini. Akhir kata penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca sekalian terutama dibidang Ilmu Sipil.

Yogyakarta, ....Januari 2026

Penulis

## DAFTAR ISI

|                                                                           |      |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| SAMPUL .....                                                              | ii   |
| PERSETUJUAN TESIS .....                                                   | ii   |
| PENGESAHAN TESIS .....                                                    | iii  |
| PERNYATAAN.....                                                           | iv   |
| KATA PENGANTAR .....                                                      | v    |
| DAFTAR ISI.....                                                           | vii  |
| DAFTAR TABEL.....                                                         | x    |
| DAFTAR GAMBAR.....                                                        | xi   |
| INTISARI.....                                                             | xiii |
| ABSTRACT.....                                                             | xiv  |
| BAB I.....                                                                | 1    |
| PENDAHULUAN .....                                                         | 1    |
| 1.1. LATAR BELAKANG.....                                                  | 1    |
| 1.2. PERUMUSAN MASALAH .....                                              | 3    |
| 1.3. BATASAN MASALAH .....                                                | 4    |
| 1.4. KEASLIAN PENELITIAN.....                                             | 6    |
| 1.5. MANFAAT PENELITIAN.....                                              | 7    |
| 1.6. TUJUAN PENELITIAN .....                                              | 8    |
| 1.7. SISTEMATIKA PENULISAN.....                                           | 9    |
| BAB II.....                                                               | 12   |
| TINJAUAN PUSTAKA .....                                                    | 12   |
| 2.1. KEKAKUAN LATERAL STRUKTUR.....                                       | 12   |
| 2.2. PENDEKATAN ANALITIKAL KLASIK DALAM EVALUASI<br>KEKAKUAN LATERAL..... | 12   |
| 2.3. PENDEKATAN BERBASIS DEFORMASI AKIBAT GAYA LATERAL<br>13              |      |
| 2.4. ANALISIS NUMERIK SEBAGAI ACUAN RESPONS AKTUAL<br>STRUKTUR.....       | 15   |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5. PENELITIAN TERDAHULU TERKAIT KEKAKUAN LATERAL DAN KETIDAKATURAN STRUKTUR .....                                    | 16 |
| 2.6. TINJAUAN MUTAKHIR DAN KESENJANGAN PENELITIAN.....                                                                 | 17 |
| BAB III .....                                                                                                          | 19 |
| LANDASAN TEORI.....                                                                                                    | 19 |
| 3.1. KONSEP KEKAKUAN LATERAL ANTAR TINGKAT .....                                                                       | 19 |
| 3.2. KEKAKUAN LATERAL AKTUAL ( $K_{ACTUAL}$ ) .....                                                                    | 19 |
| 3.3. KEKAKUAN LATERAL ANALITIKAL KLASIK ( $K_{ANALYTICAL}$ ) .....                                                     | 21 |
| 3.4. KETERBATASAN PENDEKATAN ANALITIKAL KLASIK .....                                                                   | 23 |
| BAB IV .....                                                                                                           | 25 |
| METODE PENELITIAN.....                                                                                                 | 25 |
| 4.1. PENDEKATAN PENELITIAN.....                                                                                        | 25 |
| 4.2. OBJEK DAN VARIASI STRUKTUR YANG DIANALISIS .....                                                                  | 26 |
| 4.3. ANALISIS NUMERIK DAN PENENTUAN KEKAKUAN LATERAL AKTUAL .....                                                      | 60 |
| 4.4. PERHITUNGAN KEKAKUAN LATERAL ANALITIKAL KLASIK ..                                                                 | 61 |
| 4.5. FAKTOR INTERAKSI BALOK–KOLOM ( $\alpha$ ).....                                                                    | 62 |
| 4.6. FAKTOR KOREKSI BERBASIS KONFIGURASI STRUKTUR ( $\beta$ )....                                                      | 63 |
| 4.7. FORMULASI KEKAKUAN LATERAL TERKALIBRASI ( $K_{PROPOSED}$ )65                                                      |    |
| 4.8. PROSEDUR OPTIMASI DAN EVALUASI KINERJA MODEL.....                                                                 | 65 |
| BAB V.....                                                                                                             | 67 |
| HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAAN .....                                                                                 | 67 |
| 5.1. KARAKTERISTIK MODEL STRUKTUR DAN DATA ANALISIS.....                                                               | 67 |
| 5.2. KEKAKUAN LATERAL AKTUAL ( $K_{ACTUAL}$ ) .....                                                                    | 70 |
| 5.2.1. PERBANDINGAN KEKAKUAN LATERAL ANALITIKAL ( $K_{ANALYTICAL}$ ) DAN KEKAKUAN LATERAL AKTUAL ( $K_{ACTUAL}$ )..... | 71 |
| 5.3. PENGARUH FAKTOR INTERAKSI BALOK–KOLOM ( $\alpha$ ).....                                                           | 73 |
| 5.4. KALIBRASI FAKTOR $\beta$ BERBASIS JUMLAH BENTANG .....                                                            | 76 |
| 5.5. EVALUASI KEKAKUAN LATERAL TERUSULKAN ( $K_{PROPOSED}$ ) TERHADAP KEKAKUAN LATERAL AKTUAL ( $K_{ACTUAL}$ ).....    | 79 |
| 5.6. DISKUSI DAN IMPLIKASI REKAYASA .....                                                                              | 81 |
| BAB VI .....                                                                                                           | 83 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| KESIMPULAN DAN SARAN..... | 83 |
| 6.1. KESIMPULAN .....     | 83 |
| 6.2. SARAN .....          | 84 |
| DAFTAR PUSTAKA .....      | 86 |
| LAMPIRAN .....            | 88 |



## DAFTAR TABEL

**Table 1.** Parameter Model Struktur Portal Beton Bertulang..... 68

**Table 2.** Parameter empiris yang dikalibrasi untuk faktor koreksi  $\beta$  ..... 77



## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 3. 1</b> Skema Pembebanan Lateral Dan Bentuk Deformasi Struktur Portal .....    | 20 |
| <b>Gambar 3. 2</b> Model Portal dalam Pendekatan Kekakuan Lateral Analitikal Klasik ..... | 22 |
| <b>Gambar 4. 1</b> Satu tingkat satu bentang .....                                        | 26 |
| <b>Gambar 4. 2</b> Dua Tingkat satu bentang .....                                         | 27 |
| <b>Gambar 4. 3</b> Tiga tingkat satu bentang.....                                         | 28 |
| <b>Gambar 4. 4</b> Empat Tingkat satu bentang .....                                       | 29 |
| <b>Gambar 4. 5</b> Lima tingkat satu bentang.....                                         | 30 |
| <b>Gambar 4. 6</b> Enam tingkat satu bentang.....                                         | 31 |
| <b>Gambar 4. 7</b> Tujuh tingkat satu bentang.....                                        | 32 |
| <b>Gambar 4. 8</b> Satu tingkat dua bentang.....                                          | 33 |
| <b>Gambar 4. 9</b> Dua tingkat dua bentang .....                                          | 33 |
| <b>Gambar 4. 10</b> Tiga tingkat dua bentang .....                                        | 34 |
| <b>Gambar 4. 11</b> Empat tingkat dua bentang.....                                        | 35 |
| <b>Gambar 4. 12</b> Lima tingkat dua bentang .....                                        | 36 |
| <b>Gambar 4. 13</b> Enam tingkat dua bentang .....                                        | 37 |
| <b>Gambar 4. 14</b> Tujuh tingkat dua bentang .....                                       | 38 |
| <b>Gambar 4. 15</b> <i>Satu tingkat tiga bentang</i> .....                                | 38 |
| <b>Gambar 4. 16</b> Dua tingkat tiga bentang.....                                         | 39 |
| <b>Gambar 4. 17</b> Tiga tingkat tiga bentang .....                                       | 39 |
| <b>Gambar 4. 18</b> Empat tingkat tiga bentang .....                                      | 40 |
| <b>Gambar 4. 19</b> Lima tingkat tiga bentang .....                                       | 40 |
| <b>Gambar 4. 20</b> Enam tingkat tiga bentang .....                                       | 41 |
| <b>Gambar 4. 21</b> Tujuh tingkat tiga bentang .....                                      | 42 |
| <b>Gambar 4. 22</b> Satu tingkat empat bentang.....                                       | 42 |
| <b>Gambar 4. 23</b> Dua tingkat empat bentang .....                                       | 43 |
| <b>Gambar 4. 24</b> Tiga tingkat empat bentang .....                                      | 43 |
| <b>Gambar 4. 25</b> Empat tingkat empat bentang .....                                     | 44 |

|                     |                                                                  |    |
|---------------------|------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 4. 26</b> | Lima tingkat empat bentang .....                                 | 45 |
| <b>Gambar 4. 27</b> | Enam tingkat empat bentang .....                                 | 46 |
| <b>Gambar 4. 28</b> | Tujuh tingkat empat bentang .....                                | 47 |
| <b>Gambar 4. 29</b> | Satu tingkat lima bentang .....                                  | 48 |
| <b>Gambar 4. 29</b> | Dua tingkat lima bentang.....                                    | 48 |
| <b>Gambar 4. 30</b> | Tiga tingkat lima bentang .....                                  | 49 |
| <b>Gambar 4. 31</b> | Empat tingkat lima bentang.....                                  | 49 |
| <b>Gambar 4. 32</b> | Lima tingkat lima bentang .....                                  | 50 |
| <b>Gambar 4. 33</b> | . Enam tingkat lima bentang .....                                | 51 |
| <b>Gambar 4. 34</b> | Tujuh tingkat lima bentang.....                                  | 52 |
| <b>Gambar 4. 35</b> | Satu tingkat enam bentang.....                                   | 52 |
| <b>Gambar 4. 36</b> | Dua tingkat enam bentang .....                                   | 53 |
| <b>Gambar 4. 37</b> | Tiga tingkat enam bentang.....                                   | 53 |
| <b>Gambar 4. 38</b> | Empat tingkat enam bentang .....                                 | 54 |
| <b>Gambar 4. 39</b> | Lima tingkat enam bentang .....                                  | 54 |
| <b>Gambar 4. 40</b> | Enam tingkat enam bentang.....                                   | 55 |
| <b>Gambar 4. 41</b> | Tujuh tingkat enam bentang .....                                 | 56 |
| <b>Gambar 4. 42</b> | Satu tingkat tujuh bentang .....                                 | 56 |
| <b>Gambar 4. 43</b> | Dua tingkat tujuh bentang.....                                   | 57 |
| <b>Gambar 4. 44</b> | Tiga tingkat tujuh bentang.....                                  | 57 |
| <b>Gambar 4. 45</b> | Empat tingkat tujuh bentang.....                                 | 58 |
| <b>Gambar 4. 46</b> | Lima tingkat tujuh bentang.....                                  | 58 |
| <b>Gambar 4. 47</b> | Enam tingkat tujuh bentang.....                                  | 59 |
| <b>Gambar 4. 48</b> | Tujuh tingkat tujuh bentang.....                                 | 60 |
| <b>Gambar 5. 1</b>  | <i>K</i> actual vs <i>K</i> analytical .....                     | 72 |
| <b>Gambar 5. 2</b>  | <i>K</i> actual vs $\alpha$ . <i>K</i> analytical.....           | 75 |
| <b>Gambar 5. 3</b>  | $\beta$ vs Nb.....                                               | 78 |
| <b>Gambar 5. 4</b>  | <i>K</i> actual vs $\alpha$ . $\beta$ . <i>K</i> analytical..... | 79 |

## INTISARI

Formulasi analitikal klasik untuk estimasi kekakuan lateral antar tingkat pada struktur rangka beton bertulang sistem rangka pemikul momen (SRPM) banyak digunakan dalam analisis seismik sederhana; namun demikian, formulasi tersebut cenderung memberikan estimasi kekakuan elastis yang lebih besar dibandingkan respons aktual struktur, khususnya pada konfigurasi portal dengan jumlah bentang yang banyak. Penelitian ini mengusulkan suatu kerangka kalibrasi berbasis optimasi numerik untuk meningkatkan akurasi estimasi kekakuan lateral analitikal tanpa menghilangkan sifat formulasi tertutup dari pendekatan klasik berbasis kolom. Sebanyak empat puluh sembilan (49) konfigurasi portal SRPM beton bertulang dua dimensi, dengan variasi jumlah bentang dari satu hingga tujuh, dianalisis menggunakan analisis numerik linier elastis untuk memperoleh nilai kekakuan lateral antar tingkat sebagai acuan. Formulasi kekakuan analitikal kemudian dimodifikasi dengan memperkenalkan faktor interaksi balok–kolom dan faktor koreksi empiris berbasis jumlah bentang yang dikalibrasi melalui metode optimasi kuadrat terkecil nonlinier. Keunikan pendekatan yang diusulkan terletak pada penerapan kalibrasi bergantung tingkat, dengan parameter yang dibedakan untuk lantai bawah, tengah, dan atas guna menangkap variasi kekakuan sepanjang tinggi struktur. Hasil kalibrasi menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat baik dengan respons numerik, yang ditunjukkan oleh koefisien determinasi sebesar  $R^2 = 0,9998$  dan kemiringan regresi yang mendekati satu, sehingga mengindikasikan bias yang minimal pada seluruh tingkat. Formulasi yang diusulkan memberikan pendekatan yang praktis dan efisien secara komputasi untuk estimasi kekakuan lateral antar tingkat yang andal pada struktur SRPM beton bertulang, khususnya untuk tahap pradesain dan analisis seismik sederhana.

**Kata Kunci:** Optimasi Numerik; Kekakuan Lateral Antar Tingkat; Sistem Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang (SRPM); Kalibrasi Kekakuan; Korelasi Analitikal–Numerik.

## ABSTRACT

Classical analytical formulations for estimating lateral story stiffness in reinforced concrete (RC) moment-resisting frames (MRFs) are widely used in simplified seismic analysis; however, they tend to systematically overestimate actual elastic stiffness, particularly for portal frames with multi-span configurations. This study proposes a numerical calibration framework to improve the accuracy of analytical story stiffness estimation while preserving the closed-form nature of classical column-based formulations. A total of forty-nine (49) two-dimensional RC MRF portal frame configurations, with the number of spans varying from one to seven, were analyzed using linear elastic numerical analysis to obtain reference values of lateral story stiffness. The analytical stiffness formulation was enhanced by introducing a beam–column interaction factor and a span-dependent empirical correction factor, both calibrated through nonlinear least-squares optimization. A distinctive feature of the proposed approach is the implementation of story-dependent calibration, in which separate parameter sets are assigned to base, middle, and top stories to capture stiffness variation along the building height. The calibrated formulation exhibits excellent agreement with the numerical results, achieving a coefficient of determination of  $R^2 = 0.9998$  and a regression slope close to unity, indicating minimal bias across all story levels. The proposed method offers a practical and computationally efficient tool for the reliable estimation of lateral story stiffness in RC MRF structures, particularly for preliminary design and simplified seismic analysis applications.

**Keywords:** Numerical Optimization; Lateral Story Stiffness; RC Moment-Resisting Frames; Analytical–Numerical Correlation; Stiffness Calibration.