

TESIS

**STUDI NUMERIK PERILAKU KOLOM PENDEK  
YANG DIPERKUAT DENGAN CFRP  
MENGUNAKAN METODE “*PUSHOVER ANALYSIS*”**



Made Abitya Candra Wibawa

235119741

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL PROGRAM MAGISTER

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA

2025



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

---

**PERSETUJUAN TESIS**

Nama : Made Abitya Candra Wibawa  
Nomor Mahasiswa : 235119741  
Konsentrasi : Struktur  
Judul Tesis : Studi Numerik Perilaku Kolom Pendek yang Diperkuat dengan CFRP Menggunakan Metode "Pushover Analysis"

Dosen Pembimbing

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

Tanggal

11/09/2025

Tanda Tangan

  
.....



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

**PENGESAHAN TESIS**

Nama : Made Abitya Candra Wibawa  
Nomor Mahasiswa : 235119741  
Konsentrasi : Struktur  
Judul Tesis : Studi Numerik Perilaku Kolom Pendek yang Diperkuat dengan CFRP Menggunakan Metode "Pushover Analysis"

Dosen Penguji

Tanggal Tanda Tangan

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

11/09/2025

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

11/04/2025

Anggun Tri Atmajayanti, S.T., M.Eng., Ph.D

8/9 2025

Mengetahui,



Program Studi Magister Teknik Sipil

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

## PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Made Abitya Candra Wibawa

NPM : 235119741

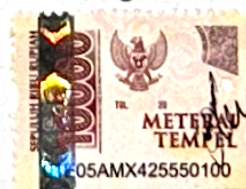
Program Studi : Magister Teknik Sipil

Tempat/Tanggal Lahir : Denpasar, 17 Juni 2002

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul : **“STUDI NUMERIK PERILAKU KOLOM PENDEK YANG DIPERKUAT DENGAN CFRP MENGGUNAKAN METODE “PUSHOVER ANALYSIS”**” adalah benar-benar karya asli saya. Seluruh sumber yang menjadi rujukan dalam tesis ini telah saya cantumkan sesuai dengan kaidah akademik yang berlaku. Apabila terdapat kesalahan di dalamnya sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya dan saya bersedia dikenakan sanksi apabila terbukti melakukan pelanggaran hukum.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Yogyakarta, Agustus 2025



Made Abitya Candra Wibawa

## INTISARI

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh perkuatan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) terhadap kinerja kolom pendek beton bertulang melalui analisis pushover menggunakan OpenSees. Kolom pendek yang memiliki rasio tinggi terhadap dimensi penampang rendah cenderung mengalami kegagalan geser dan perilaku rapuh saat beban gempa. Model portal sederhana satu bentang satu tingkat dibangun dengan elemen *nonlinear forceBeamColumn*, material beton *unconfined* dan terkonfinemen CFRP (*Concrete02*), serta baja tulangan (*Steel02*). Tahapan analisis meliputi pendefinisian geometri, material, *fiber section*, beban gravitasi, beban lateral bertahap, dan perekaman respons struktur. Tiga skenario dianalisis: tanpa CFRP, satu lapis CFRP, dan dua lapis CFRP. Hasil menunjukkan peningkatan kapasitas geser, kekakuan lateral, dan daktilitas; *base shear* naik 2,2% untuk satu lapis dan 3,4% untuk dua lapis dibandingkan tanpa CFRP. CFRP terbukti efektif meningkatkan kinerja seismik kolom pendek, terutama dalam menahan keruntuhan geser dan memperbaiki deformasi pasca-elastis..

**Kata-kata kunci : CFRP, kolom pendek, pushover analysis**

## ABSTRACT

*This study evaluates the effect of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) strengthening on the performance of short reinforced concrete columns through pushover analysis using OpenSees. Short columns with a low height-to-cross-section ratio tend to experience shear failure and brittle behavior under seismic loads. A simple one-bay, one-story portal frame model was constructed using nonlinear forceBeamColumn elements, unconfined and CFRP-confined concrete material (Concrete02), and reinforcing steel (Steel02). The analysis stages included defining the geometry, materials, fiber sections, gravity loads, incremental lateral loads, and recording the structural responses. Three scenarios were analyzed: without CFRP, with one layer of CFRP, and with two layers of CFRP. The results show an increase in shear capacity, lateral stiffness, and ductility; base shear increased by 2.2% for one layer and 3.4% for two layers compared to the unstrengthened column. CFRP has proven effective in enhancing the seismic performance of short reinforced concrete columns, particularly in resisting shear failure and improving post-elastic deformation capacity.*

**Keywords :** *CFRP, short column, pushover analysis*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala karuniaNya yang telah diberikan sehingga dapat menyelesaikan laporan Tesis ini dengan baik.

Laporan Tesis ini disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik dari Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Selama penyelesaian Tesis ini, penulis telah mendapat banyak bimbingan dan bantuan serta doa dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Pertama dan terutama untuk Tuhan Yang Maha Esa karena cinta dan kasih-NYA yang berlimpah, maka penulis diperkenankan-NYA dapat menyelesaikan tesis ini serta memperoleh gelar Magister Teknik Sipil Struktur sesuai dengan waktunya.
2. Bapak Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. AM. Ade Lisantono, M. Eng., IPU, ASEAN ENG dan ibu Anggun Tri Atmajayanti, S.T., M. Eng., Ph.D. selaku dosen penguji yang sudah memberi masukan yang baik bagi penulis. Terimakasih untuk segala masukannya bagi penulis untuk menyusun penulisan tesis menjadi lebih baik lagi.

4. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Pascasarjana Magister Teknik Sipil Struktur yang namanya tidak bisa saya sebutkan satu per satu. Terima kasih karena telah membimbing dan membagi ilmu selama saya menuntut ilmu dalam perkuliahannya.
5. Papa I Nyoman Bhisana, Mama Christina Henri Setiorini, dan Kakak Ni Luh Citisa Candra Dewi atas dukungan dan doanya selama saya berkarir dan menempuh pendidikan, yang selalu memberikan motivasi sehingga saya dapat menyelesaikan pendidikan ini.
6. Serta pihak-pihak lain yang telah mendukung yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun. Akhir kata, harapan penulis semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Yogyakarta, Agustus 2025

Penyusun

Made Abitya Candra Wibawa

## DAFTAR ISI

|                                                      |       |
|------------------------------------------------------|-------|
| PERSETUJUAN TESIS.....                               | ii    |
| PENGESAHAN TESIS .....                               | iii   |
| PERNYATAAN.....                                      | iv    |
| INTISARI.....                                        | v     |
| ABSTRACT.....                                        | vi    |
| KATA PENGANTAR.....                                  | vii   |
| DAFTAR ISI .....                                     | ix    |
| DAFTAR GAMBAR .....                                  | xv    |
| DAFTAR TABEL.....                                    | xvi   |
| DAFTAR PERSAMAAN .....                               | xvii  |
| DAFTAR SIMBOL .....                                  | xviii |
| BAB I    PENDAHULUAN .....                           | 1     |
| 1.1    Latar Belakang .....                          | 1     |
| 1.2    Perumusan Masalah .....                       | 2     |
| 1.3    Batasan Masalah.....                          | 2     |
| 1.4    Keaslian Penelitian.....                      | 3     |
| 1.5    Manfaat Penelitian .....                      | 4     |
| 1.6    Tujuan Penelitian.....                        | 4     |
| BAB II   TINJAUAN PUSTAKA.....                       | 6     |
| 2.1    Kolom Pendek dan Perilaku Strukturalnya ..... | 6     |
| 2.2    Penguatan Kolom dengan CFRP.....              | 6     |

|         |                                                       |    |
|---------|-------------------------------------------------------|----|
| 2.3     | Konsep Pengekangan Beton dengan CFRP .....            | 7  |
| 2.4     | Radius Lengkung Sudut Kolom.....                      | 7  |
| 2.5     | Analisis Pushover pada Struktur Beton Bertulang.....  | 9  |
| 2.6     | Penelitian Terdahulu.....                             | 9  |
| BAB III | LANDASAN TEORI.....                                   | 11 |
| 3.1     | Kolom Pendek.....                                     | 11 |
| 3.2     | Karakteristik Kegagalan Kolom Pendek.....             | 12 |
| 3.2.1   | Kegagalan Geser .....                                 | 12 |
| 3.2.2   | Kegagalan Tekan .....                                 | 12 |
| 3.2.3   | Tidak terjadi Kegagalan Lentur.....                   | 12 |
| 3.3     | CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Polymer).....        | 13 |
| 3.4     | Cara Kerja CFRP dalam Memperkuat Beton.....           | 14 |
| 3.4.1   | Pengekangan Beton dengan CFRP.....                    | 14 |
| 3.4.2   | Peningkatan Kekuatan Geser dengan CFRP .....          | 15 |
| 3.4.3   | Kontribusi Gaya Tambahan oleh CFRP .....              | 15 |
| 3.4.4   | Teori interaksi ikatan Beton-CFRP .....               | 16 |
| 3.5     | Perhitungan Parameter Pengekangan.....                | 17 |
| 3.5.1   | Koefisien Efisiensi Pengekangan Bentuk Tak Bulat..... | 17 |
| 3.5.2   | Luas Penampang Kolom Membulat ( $A_g$ ) .....         | 18 |

|        |                                                     |    |
|--------|-----------------------------------------------------|----|
| 3.5.3  | Diameter Ekuivalen Kolom Persegi ( <i>D</i> ) ..... | 18 |
| 3.5.4  | Kekuatan Tekan.....                                 | 19 |
| 3.5.5  | <i>Ultimate Stress</i> .....                        | 19 |
| 3.5.6  | <i>Ultimate Strain</i> .....                        | 19 |
| 3.6    | <i>OpenSees</i> .....                               | 21 |
| 3.6.1  | <i>Concrete02</i> .....                             | 21 |
| 3.6.2  | <i>Steel02</i> .....                                | 22 |
| 3.6.3  | <i>Unconfined</i> dan <i>Confined</i> .....         | 23 |
| 3.6.4  | <i>BuildCrectSection</i> .....                      | 24 |
| 3.7    | Analisis <i>Pushover</i> .....                      | 27 |
| BAB IV | METODOLOGI PENELITIAN.....                          | 32 |
| 4.1    | Data dan Materi.....                                | 32 |
| 4.1.1  | Benda Uji .....                                     | 32 |
| 4.1.2  | Material .....                                      | 34 |
| 4.2    | Instrumen Penelitian.....                           | 36 |
| 4.2.1  | Skrip Pemodelan ( <i>TCL Script</i> ).....          | 36 |
| 4.2.2  | Model Struktur Digital .....                        | 36 |
| 4.2.3  | Perangkat Lunak <i>OpenSees</i> .....               | 36 |
| 4.2.4  | <i>Spreadsheets Excel</i> .....                     | 37 |

|       |                                         |    |
|-------|-----------------------------------------|----|
| 4.3   | Langkah-langkah Penelitian.....         | 37 |
| 4.3.1 | Studi Literatur .....                   | 37 |
| 4.3.2 | Penyusunan Model Struktur.....          | 37 |
| 4.3.3 | Pendefinisian Material .....            | 38 |
| 4.3.4 | Pembuatan Variasi Model .....           | 38 |
| 4.3.5 | Analisis <i>Pushover</i> .....          | 39 |
| 4.3.6 | Pengolahan Data.....                    | 39 |
| 4.3.7 | Inteprestasi dan Analisis Hasil .....   | 39 |
| 4.3.8 | Penarikan Kesimpulan .....              | 39 |
| 4.4   | Pembuatan Skrip .....                   | 39 |
| 4.4.1 | Persiapan awal.....                     | 39 |
| 4.4.2 | Pembuatan Model Geometri Struktur ..... | 40 |
| 4.4.3 | Pendefinisian Material .....            | 40 |
| 4.4.4 | Pembuatan Penampang Fiber Section.....  | 40 |
| 4.4.5 | Pembuatan Elemen Struktur.....          | 40 |
| 4.4.6 | Penerapan Beban.....                    | 41 |
| 4.4.7 | Pendefinisian Analisis .....            | 41 |
| 4.4.8 | Output dan Evaluasi .....               | 41 |
| 4.5   | Data Material.....                      | 42 |

|        |                                                                 |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 4.5.1  | Untuk Model tanpa CFRP (K) .....                                | 42 |
| 4.5.2  | Untuk Model Satu Lapis CFRP (K1) .....                          | 42 |
| 4.5.3  | Untuk Model Dua Lapis CFRP (K2).....                            | 44 |
| 4.6    | Analisis.....                                                   | 46 |
| 4.6.1  | Pembebanan Gravitasi.....                                       | 46 |
| 4.6.2  | Pembebanan Lateral <i>Pushover</i> .....                        | 47 |
| 4.7    | Skrip <i>OpenSees</i> .....                                     | 47 |
| 4.7.1  | Analisis <i>Gravity</i> .....                                   | 47 |
| 4.7.2  | Analisis <i>Pushover</i> .....                                  | 49 |
| 4.8    | Cara Menjalankan <i>Script OpenSees</i> .....                   | 52 |
| 4.9    | Kendala Penelitian dan Upaya Pemecahnya .....                   | 54 |
| 4.9.1  | Mendefinisikan Material Beton Terkekang CFRP .....              | 54 |
| BAB V  | HASIL DAN PEMBAHASAN .....                                      | 55 |
| 5.1    | Hasil .....                                                     | 55 |
| 5.2    | Kurva Kapasitas .....                                           | 55 |
| 5.3    | Pengaruh Perkuatan CFRP terhadap Kapasitas Geser Struktur ..... | 57 |
| 5.4    | Pengaruh Perkuatan CFRP terhadap Tegangan Ultimit Beton.....    | 59 |
| 5.5    | Analisis Kapasitas Geser dan Rotasi Kolom.....                  | 60 |
| BAB VI | KESIMPULAN DAN SARAN.....                                       | 62 |
| 6.1    | Kesimpulan .....                                                | 62 |

|     |                     |    |
|-----|---------------------|----|
| 6.2 | Saran.....          | 63 |
|     | DAFTAR PUSTAKA..... | 65 |
|     | LAMPIRAN.....       | 68 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1. Beton secara Efektif dalam Kolom Persegi.....              | 8  |
| Gambar 3.1. <i>BuildRCrectSection</i> .....                            | 26 |
| Gambar 3.2. Contoh Kurva Kapasitas.....                                | 28 |
| Gambar 3.3. Contoh Kurva Kapasitas Pushover dengan Titik Penting ..... | 29 |
| Gambar 4.1. Detail Kolom .....                                         | 32 |
| Gambar 4.2. Detail Balok.....                                          | 33 |
| Gambar 4.3. Portal Sederhana.....                                      | 34 |
| Gambar 4.4. Pembebanan .....                                           | 46 |
| Gambar 4.5. <i>Script Run_Pushover.tcl</i> .....                       | 53 |
| Gambar 4.6. Menjalankan <i>Script</i> .....                            | 53 |
| Gambar 5.1. Hasil Kurva Kapasitas antara K, K1, dan K2.....            | 56 |
| Gambar 5.2. Diagram Perbandingan <i>Base Shear Max</i> .....           | 58 |
| Gambar 5.3. Diagram Perbandingan <i>Ultimate Stress</i> .....          | 59 |
| Gambar 5.4. Kurva Kapasitas Kolom .....                                | 60 |

## DAFTAR TABEL

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Tabel 3.1. Parameter CFRP .....                      | 13 |
| Tabel 4.1. Benda Uji.....                            | 32 |
| Tabel 4.2. Material Beton.....                       | 35 |
| Tabel 4.3. Material Baja Tulangan .....              | 35 |
| Tabel 4.4. Material CFRP.....                        | 36 |
| Tabel 4.5. Parameter K.....                          | 42 |
| Tabel 4.6. Parameter K1 .....                        | 43 |
| Tabel 4.7. Parameter K2 .....                        | 44 |
| Tabel 5.1. Perbandingan Peningkatan .....            | 57 |
| Tabel 5.2. Perbandingan Peningkatan pada Kolom ..... | 60 |

## DAFTAR PERSAMAAN

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| (3.1) Aspek Rasio .....                      | 11 |
| (3.2) Koefisien Efisien .....                | 17 |
| (3.3) Luas Penampang.....                    | 18 |
| (3.4) Diameter Ekuivalen Kolom Persegi ..... | 18 |
| (3.5) Tekanan Lateral .....                  | 18 |
| (3.6) Kekuatan Tekan .....                   | 19 |
| (3.7) <i>Ultimate Stress</i> .....           | 19 |
| (3.8) <i>Ultimate Strain</i> .....           | 20 |
| (3.9) Rasio Pembungkus .....                 | 20 |

## DAFTAR SIMBOL

|             |                                                       |
|-------------|-------------------------------------------------------|
| $A_e$       | : Luas area efektif yang terkekang CFRP               |
| $A_g$       | : Luas penampang bruto kolom dengan sudut membulat    |
| $A_s$       | : Luas total tulangan longitudinal                    |
| $b$         | : Panjang sisi penampang kolom                        |
| $D$         | : diameter ekuivalen kolom persegi                    |
| $E_{frp}$   | : Modulus elastisitas CFRP                            |
| $E_s$       | : Modulus elastisitas baja tulangan                   |
| $f_c$       | : Kuat tekan beton tak terkekang                      |
| $f_{cc}$    | : Kuat tekan beton terkekang CFRP                     |
| $f_i$       | : Tekanan lateral akibat CFRP                         |
| $f_l$       | : Tekanan lateral efektif                             |
| $f_u$       | : Tegangan ultimit beton                              |
| $f_y$       | : Tegangan leleh tulangan baja                        |
| $h$         | : Tinggi penampang kolom                              |
| $k_e$       | : Efisiensi pengekangan lateral                       |
| $k_i$       | : Faktor peningkatan kekuatan tekan beton akibat CFRP |
| $k_s$       | : Koefisien efisiensi pengekangan bentuk tak bulat    |
| $n$         | : Jumlah lapisan CFRP                                 |
| $P_{frp}$   | : Rasio pembungkus CFRP untuk kolom persegi           |
| $\rho_{sc}$ | : Rasio tulangan longitudinal                         |
| $R$         | : Radius lengkung sudut kolom                         |
| $t_{frp}$   | : Tebal lapisan CFRP                                  |

|                     |                                           |
|---------------------|-------------------------------------------|
| $V_b$               | : Gaya geser dasar                        |
| $\Delta$            | : Perpindahan lateral                     |
| $\varepsilon_{c0}$  | : Regangan pada kuat tekan maksimum beton |
| $\varepsilon_{cu}$  | : Regangan ultimit beton terkekang        |
| $\varepsilon_{frp}$ | : Regangan ultimit CFRP                   |
| $\lambda$           | : Rasio geser kolom                       |