

TESIS

**ANALISIS KEANDALAN PERILAKU GESER
BALOK BETON BERTULANG GEOPOLIMER
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA
DENGAN FUNGSI BATAS IMPLISIT**



ARNOLDUS OTTO FREDRIK CANGKUNG

NPM: 225119279

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA
2024**



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

PERSETUJUAN TESIS

Nama : Arnoldus Otto Fredrik Cangkung
Nomor Mahasiswa : 225119279
Konsentrasi : Struktur
Judul tesis : Analisis Keandalan Perilaku Geser Balok Beton Bertulang
Gopolimer Menggunakan Metode Elemen Hingga Dengan
Fungsi Batas Implisit

Dosen Pembimbing

Tanggal Tanda Tangan

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

17/07/2024



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

PENGESAHAN TESIS

Nama : ARNOLDUS OTTO FREDRIK CANGKUNG
Nomor Mahasiswa : 225119279
Konsentrasi : Struktur
Judul tesis : Analisis Keandalan Perilaku Geser Balok Beton Bertulang Geopolimer Menggunakan Metode Elemen Hingga Dengan Fungsi Batas Implisit

Dosen Penguji

Tanggal Tanda Tangan

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

09/08/2024

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

9/8/2024

Dr. Ir. Junaedi Utomo, M.Eng

9/8/2024

Mengetahui,



Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil

FAKULTAS
TEKNIK
UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA

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

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tesis dengan Judul :

**ANALISIS KEANDALAN PERILAKU GESER
BALOK BETON BERTULANG GEOPOLIMER
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA
DENGAN FUNGSI BATAS IMPLISIT**

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 akan saya kembalikan kepada Rektor Universitas Atma Jaya Yogyakarta.



Yogyakarta, 9 Agustus 2024

Arnoldus Otto Fredrik Cangkung

NPM: 225 119 279

INTISARI

Prinsip umum desain adalah bahwa setiap struktur harus memenuhi persyaratan keselamatan dan kemudahan pelayanan dalam penggunaannya selama masa pakai. Teori tentang keandalan struktur telah dikembangkan untuk menggambarkan dan menganalisis ketidakpastian dengan cara yang rasional dan diperhitungkan dalam tahapan desain dan evaluasi kinerja struktur.

Pada penelitian ini analisa numerik direncanakan dengan dua pemodelan balok beton bertulang geopolimer yang merupakan hasil eksperimen sebelumnya yaitu balok dengan tulangan geser (GS) maupun balok tanpa tulangan geser (GN) yang masing-masing memiliki rasio $a/d = 4,5$ dan $a/d = 5$ dimana spesifikasi masing-masing balok yaitu balok pemodelan 1 dengan panjang $L = 1,95$ m, tinggi = $0,225$ m dan lebar = $0,150$ m lalu balok pemodelan 2 dengan panjang $L = 1,77$ m, tinggi = $0,225$ m dan lebar = $0,150$. Analisis numerik menggunakan metode elemen hingga dengan fungsi batas implisit dengan menggunakan simulasi Monte Carlo dan langkah-langkah perhitungan menggunakan program bantu OpenSeespy.

Berdasarkan analisis numerik diperoleh nilai keandalan balok beton geopolimer yang di uji GN-4,5 = 2,46, GN-5 = 2,69, GS-4,5 = 3,03 dan GS-5 = 3,31. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda, hal ini dapat dilihat dari grafik hubungan beban dan lendutan yang ada. Dan dengan simulasi monte carlo pada iterasi yang ke 50 terjadi konvergen.

Kata Kunci: Analisis Keandalan, Beton Geopolimer, Metode Elemen Hingga, Fungsi batas implisit, OpenSeespy, Simulasi Monte Carlo

ABSTRACT

The general principle of design is that any structure should fulfil the requirements of safety and serviceability in its during its service life. The theory of structural reliability has been developed to describe and analyse uncertainties in a rational way and is taken into account in the design and performance evaluation stages of structures.

In this study, numerical analysis is planned with two modelling geopolymer reinforced concrete beams which are the results of previous experiments, namely beams with shear reinforcement (GS) and beam without shear reinforcement (GN), each of which has $a/d = 4.5$ and $a/d = 5$ ratios where the specifications of each beam are modelling 1 with length $L = 1,95$ m, height $= 0,225$ m and width $= 0,150$ m. Numerical analysis using finite element method with implicit limit state function using Monte Carlo simulation and calculation step using OpenSeespy auxiliary programme.

Based on the numerical analysis, the reliability values of the tested geopolymer concrete beams $GN-4,5 = 2,46$, $GN-5 = 2,69$, $GS-4,5 = 3,03$ and $GS-5 = 3,31$ were obtained. Comparison of simulation and experimental results shows results that are not much different, this can be seen from the existing load and deflection relationship graph. And with Monte Carlo Simulation at the 50th iteration converged.

Keywords: *Reliabilty analysis, Geopolymer Concrete, Finite Element Method, Implicit Limit State Fungction, OpenSeespy, Monte Carlo Simulation*

KATA PENGANTAR

Puji syukur dan hormat penulis haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tesis dengan baik yang berjudul **“Analisis Keandalan Perilaku Geser Balok Beton Bertulang Geopolimer Menggunakan Metode Elemen Hingga Dengan Fungsi Batas Implisit”**.

Tujuan dari penyusunan Laporan Tesis ini yaitu untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan tinggi program Strata-2 (S-2) pada Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan tesis ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis membutuhkan masukan dan saran yang bersifat membangun. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak- pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan Tesis ini, antara lain kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. AM. Ade Lisantono, M.Eng., IPU, ASEAN Eng, Dekan Fakultas Teknik Universtas Atma Jaya sekaligus Dosen Pembimbing yang bersedia memberikan bimbingan, arahan dan masukan.
2. Bapak Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M. Eng., Ph.D dan Bapak Dr. Ir Junaedi Utomo, M.Eng selaku dosen penguji yang sudah memberikan masukan dan arahan.
3. Ibu Dr. Ir. Nectaria Putri Pramesti, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil.
4. Segenap dosen Magister Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta yang telah bersedia mendidik, mengajar dan membagi ilmunya kepada

penulis.

5. Alm. Bapa dan mama serta saudara-saudari tersayang yang telah senantiasa mendoakan, kasih sayang dan perhatian.
6. Teman-teman seperjuangan Pak Hen, Mas Dika, Rey, Rafi, Abi, Mas Adi, Valdo, Yoseph Satrio yang selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
7. Seluruh teman-teman Magister Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta Angkatan 2022. Terima kasih untuk kebersamaannya.

Yogyakarta, 09 Agustus 2024

Penulis

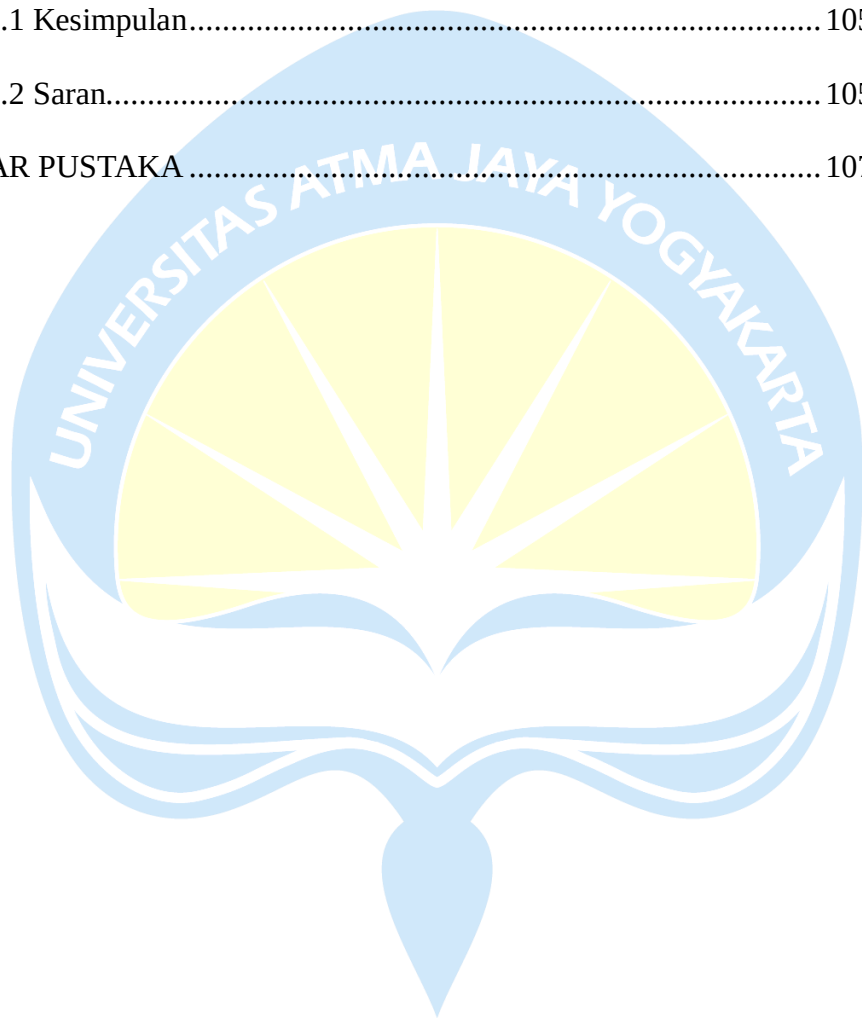
Arnoldus Otto Fredrik Cangkung

DAFTAR ISI

JUDUL	i
PERSETUJUAN TESIS	ii
PENGESAHAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN.....	iv
INTISARI	v
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGHANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Keaslian Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Tujuan Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
BAB III LANDASAN TEORI.....	11
3.1 Balok Beton Bertulang.....	11
3.2 Perilaku Balok Akibat Gaya Geser	11

3.2.1 Kapasitas Geser Balok Beton.....	12
3.2.2 Model Konstitutif Beton	12
3.2.3 Model Konstitutif Baja.....	14
3.2.4 Kekuatan Penampang Balok Struktur Beton Bertulang.....	16
3.2.5 Pengertian Beton Geopolimer	17
3.2.6 Model Tegangan Regangan Beton Geopolimer	19
3.2.7 Metode Elemen Hingga	19
3.2.8 Variabel Random	22
3.2.9 Distribusi Probabilitas Variabel Random.....	26
3.3 Analisis Keandalan Struktur.....	33
3.4 Simulasi Monte Carlo	36
3.5 Perumusan Hipotesis.....	37
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN.....	39
4.1 Jenis Penelitian	39
4.2 Bahan Penelitian	39
4.2.1 Abu Terbang (<i>fly Ash</i>).....	39
4.2.2 Agregat.....	39
4.2.3 Larutan Alkali.....	40
4.2.4 Penguatan Baja.....	40
4.3 Detail Balok.....	41
4.4 Asumsi retakan	44
4.5 Asumsi Bonding.....	44
4.6 Diagram Alir Penelitian.....	44

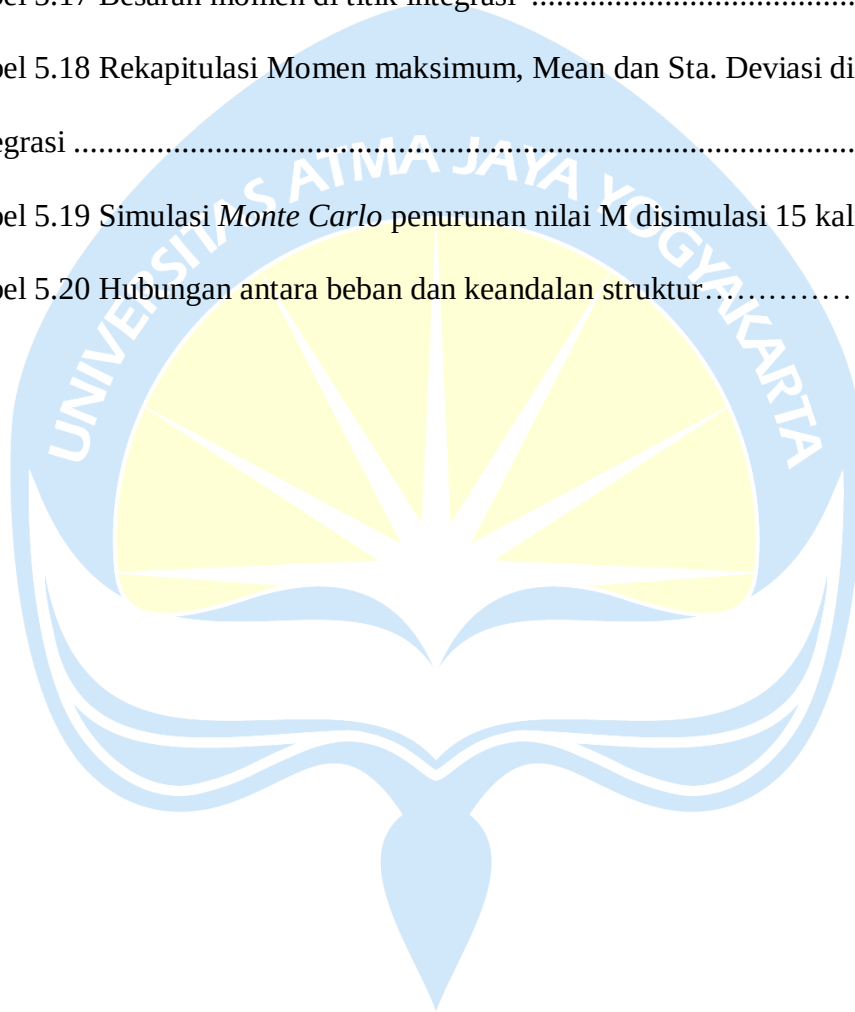
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
5.1 Pemodelan dan Analisa Struktur.....	47
5.2 Pemodelan dengan <i>OpenSeespy Anaconda Spyder</i> versi 5.....	51
5.2.1 Balok ramping beton geoplimer dengan tulangan GS 4,5	51
5.2.2 Balok ramping beton geoplimer dengan tulangan GS 5	65
5.2.3 Balok ramping beton geoplimer dengan tulangan GN 4,5	78
5.2.4 Balok ramping beton geoplimer dengan tulangan GN 5	91
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	105
6.1 Kesimpulan.....	105
6.2 Saran.....	105
DAFTAR PUSTAKA	107



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Contoh <i>Probability Mass Function</i>	24
Tabel 4.1 Komposisi Kimia <i>Fly Ash</i>	41
Tabel 5.1 Data-data balok.....	49
Tabel 5.2 Data-data hasil eksperimen dengan tulangan	50
Tabel 5.3 Data-data hasil ekseperimen tanpa tulangan	50
Tabel 5.4 Lendutan pada tengah bentang	57
Tabel 5.5 Besaran momen di titik integrasi	59
Tabel 5.6 Rekapitulasi Momen maksimum, Mean dan Sta. Deviasi di titik integrasi	61
Tabel 5.7 Simulasi <i>Monte Carlo</i> penurunan nilai M disimulasi 15 kali.....	63
Tabel 5.8 Lendutan pada tengah bentang	70
Tabel 5.9 Besaran momen di titik integrasi	72
Tabel 5.10 Rekapitulasi Momen maksimum, Mean dan Sta. Deviasi di titik integrasi	74
Tabel 5.11 Simulasi <i>Monte Carlo</i> penurunan nilai M disimulasi 15 kali...	76
Tabel 5.12 Lendutan pada tengah bentang	83
Tabel 5.13 Besaran momen di titik integrasi	85
Tabel 5.14 Rekapitulasi Momen maksimum, Mean dan Sta. Deviasi di titik integrasi	87
Tabel 5.15 Simulasi <i>Monte Carlo</i> penurunan nilai M disimulasi 15 kali...	89
Tabel 5.16 Lendutan pada tengah bentang	96

Tabel 5.17 Besaran momen di titik integrasi	98
Tabel 5.18 Rekapitulasi Momen maksimum, Mean dan Sta. Deviasi di titik integrasi	100
Tabel 5.19 Simulasi <i>Monte Carlo</i> penurunan nilai M disimulasi 15 kali...	102
Tabel 5.20 Hubungan antara beban dan keandalan struktur.....	104



DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Perilaku Geser Elemen Lentur	12
Gambar 3.2 Model Konstitutif Beton (Nawy, G.E., 1996).....	13
Gambar 3.3 Model Konstitutif Baja (Nawy, G.E., 1996).....	15
Gambar 3.4 Model Kurva Bilinear dari Model Konstitutif baja.....	16
Gambar 3.5 Skema pembentukan beton geopolimer	18
Gambar 3.6 Ikatan Polimerisasi SiO_4 dan AlO_4 Geopolimer	18
Gambar 3.7 Ikatan Polimerisasi Si dan Al.....	18
Gambar 3. 8 Macam-macam Model Elemen	20
Gambar 3.9 Element Type C38R	21
Gambar 3.10 Elemen Tipe T3D2	21
Gambar 3.11 <i>Three Dimensional Solid Element</i>	22
Gambar 3.12 Konsep <i>Embedded Element</i>	24
Gambar 3.13 Skema variabel Random Sebagai Suatu Fungsi	26
Gambar 3.14 PMF dan CDF Variabel Random Diskret.....	31
Gambar 3.15 Variabel Random Kontinu	32
Gambar 3.16 PDF dan CDF Fungsi Distribusi Normal	34
Gambar 3.17 PDF Fungsi Distribusi Log-Normal LN.....	35
Gambar 3.18 Kurva Fungsi Distribusi R dan S	36
Gambar 4.1 Detail potongan melintang balok dengan tulangan geser.....	41
Gambar 4.2 Detail potongan melintang balok tanpa tulangan geser	42

Gambar 4.3 Detail penampang memanjang balok dengan tulangan geser .	42
Gambar 4.4 Detail penampang memanjang balok tanpa tulangan geser ...	42
Gambar 4.5 Retakan pada balok geopolimer dengan tul. balok GS-4,5	43
Gambar 4.6 Retakan pada balok geopolimer tanpa tul. balok GN-5	43
Gambar 4.7 Retakan pada balok geopolimer dengan tul. balok GS-5	43
Gambar 4.8 Retakan pada balok geopolimer tanpa tul. balok GN-4,5	43
Gambar 4.9 Diagram alir penelitian.....	46
Gambar 5.1 Pemodelan memanjang balok beton geopolimer dimana a/d = 5.....	48
Gambar 5.2 Pemodelan melintang balok beton geopolimer dimana a/d = 5.....	48
Gambar 5.3 Pemodelan memanjang balok beton geopolimer dimana a/d = 4,5.....	49
Gambar 5.4 Pemodelan melintang balok beton geopolimer dimana a/d = 4,5.....	49
Gambar 5.5 Analisa bidang geser pada pemodelan balok a/d=5	51
Gambar 5.6 Analisa bidang geser pada pemodelan balok a/d=4,5	51
Gambar 5.7 <i>Part fiber elemen</i> pada <i>OpenSeespy</i> (Balok GS-4,5).....	56
Gambar 5.8 Kurva perbandingan beban dan lendutan balok	58
Gambar 5.9 Grafik hasil simulasi <i>Monte Carlo</i>	64
Gambar 5.10 <i>Part fiber element</i> pada <i>OpenSeespy</i> (Balok GS-5).....	69
Gambar 5.11 Kurva perbandingan beban dan lendutan balok.....	71
Gambar 5.12 Grafik hasil simulasi <i>Monte Carlo</i>	77

Gambar 5.13 <i>Part fiber element</i> pada <i>OpenSeespy</i> (Balok GN-4,5)	82
Gambar 5.14 Kurva perbandingan beban dan lendutan balok.....	84
Gambar 5.15 Grafik hasil simulasi <i>Monte Carlo</i>	90
Gambar 5.16 <i>Part fiber element</i> pada <i>OpenSeespy</i> (Balok GN-5)	95
Gambar 5.17 Kurva perbandingan beban dan lendutan balok.....	97
Gambar 5.18 Grafik hasil simulasi <i>Monte Carlo</i>	103
Gambar 5.19 Grafik hubungan antara beban dan keandalan struktur	104