

SKRIPSI

EVALUASI DESAIN DAN PREDIKSI KERUNTUHAN STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG PEMIKUL MOMEN MENENGAH MENGGUNAKAN METODE KESEIMBANGAN ENERGI



**ANGELA MAUDY
NPM : 6101801173**

PEMBIMBING: Helmy Hermawan Tjahjanto, Ph.D.

KO-PEMBIMBING: Wisena Perceka, Ph.D.

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-
ISK/S/X/2021)
BANDUNG
JANUARI 2022**

SKRIPSI
EVALUASI DESAIN DAN PREDIKSI KERUNTUHAN
STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG
PEMIKUL MOMEN MENENGAH MENGGUNAKAN
METODE KESEIMBANGAN ENERGI



NAMA: ANGELA MAUDY
NPM: 6101801173

PEMBIMBING: Helmy Hermawan Tjahjanto, Ph.D.

**KO-
PEMBIMBING:** Wisena Perceka, Ph.D.

PENGUJI 1: Dr. Paulus Karta Wijaya

PENGUJI 2: Dr.-Ing Dina Rubiana Widarda

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-
ISK/S/X/2021)
BANDUNG
JANUARI 2022

PERNYATAAN

Yang bertandatangan di bawah ini, saya dengan data diri sebagai berikut:

Nama : Angela Maudy
NPM : 6101801173
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa skripsi ~~Tesis / disertasi~~ dengan judul:

Evaluasi Desain dan Prediksi Keruntuhan Struktur Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Menengah Menggunakan Metode Keseimbangan Energi

adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan dosen pembimbing dan ko-pembimbing. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala resiko, akibat, dan/atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan: di Jakarta

Tanggal: 4 Januari 2022



Angela Maudy
6101801173

EVALUASI DESAIN DAN PREDIKSI KERUNTUHAN STRUKTUR RANGKA BETON BETULANG PEMIKUL MOMEN MENENGAH MENGGUNAKAN METODE KESEIMBANGAN ENERGI

Angela Maudy
NPM: 6101801173

Pembimbing: Helmy Hermawan Tjahjanto, Ph.D.
Ko-Pembimbing: Wisena Perceka, Ph.D.

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)

BANDUNG
JANUARI 2022

ABSTRAK

Analisis nonlinier terdiri dari analisis beban dorong yang paling sederhana dan analisis riwayat waktu respons nonlinier, dimana kedua metode tersebut sudah banyak digunakan di Indonesia dan sudah diatur dalam SNI 1726:2019. Metode analisis riwayat waktu respons nonlinier memberikan hasil yang lebih akurat. Akan tetapi, metode tersebut memerlukan waktu analisis yang lebih lama. Oleh karena itu, metode keseimbangan energi yang prosesnya sederhana dikembangkan dari analisis beban dorong untuk mengevaluasi desain struktur dan memprediksi keruntuhan. Studi ini menerapkan metode keseimbangan energi pada struktur rangka beton bertulang pemikul momen menengah yang didesain berdasarkan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Setelah dimensi dan konfigurasi tulangan balok dan kolom diperoleh, analisis beban dorong dilakukan untuk mendapatkan kurva kapasitas. Dengan analisis beban dorong, didapatkan level kinerja struktur adalah *immediate occupancy*. Selanjutnya, kurva kapasitas dikonversi menjadi kurva *energy capacity*. Titik perpotongan antara kurva *energy capacity* dan *energy demand* yang didapatkan dari persamaan keseimbangan energi menunjukkan simpangan maksimum pada tingkatan gempa yang ditinjau. Untuk mendapatkan nilai percepatan spektral gempa, S_a penyebab keruntuhan dan simpangan saat struktur akan runtuh, kurva *energy demand* ditingkatkan hingga ujung kurva tersebut berpotongan dengan ujung kurva *energy capacity*. Sebagai pembanding, digunakan tiga gerakan tanah untuk analisis riwayat waktu respon nonlinier. Percepatan spektral dari masing-masing gerakan tanah yang sudah diskalakan sesuai prosedur yang tercantum di dalam SNI 1726:2019, diperbesar menjadi nilai S_a runtuh pada metode keseimbangan energi untuk mengetahui apakah bangunan akan runtuh akibat percepatan spektral tersebut. Analisis keruntuhan menggunakan metode keseimbangan energi yang diterapkan pada studi ini menghasilkan S_a gempa sebesar 1,02101g dengan simpangan atap maksimum saat bangunan akan runtuh sebesar 0,16 m, simpangan maksimum saat gempa $2/3$ MCE sebesar 0,053 m dan pada gempa MCE sebesar 0,068 m. Nilai S_a penyebab runtuh dan simpangan maksimum saat akan runtuh jauh lebih besar daripada saat gempa $2/3$ MCE dan MCE yang berarti struktur memiliki kapasitas yang jauh lebih besar daripada yang dibutuhkan. Hasil analisis riwayat waktu menunjukkan pada S_a maksimum sama dengan S_a penyebab keruntuhan pada metode keseimbangan energi, balok mengalami kegagalan. Selain itu, *interstory-drift* akibat tiga gerakan tanah yang sudah diskalakan memiliki nilai yang tidak berbeda jauh dengan metode keseimbangan energi. Oleh karena itu, hasil studi menunjukkan bahwa metode keseimbangan energi cukup akurat dalam menganalisis keruntuhan struktur rangka beton bertulang pemikul momen menengah.

Kata Kunci: Metode Keseimbangan Energi, Prediksi Keruntuhan, Analisis Beban Dorong, Analisis Riwayat Waktu Respons Nonlinier

SEISMIC DESIGN EVALUATION AND COLLAPSE PREDICTION OF REINFORCED CONCRETE INTERMEDIATE MOMENT FRAME USING ENERGY BALANCE METHOD

Angela Maudy
NPM: 6101801173

Advisor: Helmy Hermawan Tjahjanto, Ph.D.
Co-Advisor: Wisena Perceka, Ph.D.

PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING DEPARTMENT OF CIVIL
ENGINEERING

(Accredited by SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)

BANDUNG
JANUARY 2022

ABSTRACT

Non-linear analysis consists of pushover analysis which is the simplest non-linear analysis and non-linear time history analysis (NLTHA), which have been used frequently in Indonesia and have been regulated in SNI 1726:2019. NLTHA gives more accurate results than other methods. However, this method requires a longer time. Hence, energy balance method that has a simple procedure was developed from pushover analysis for structure design evaluation and collapse prediction. This study applied energy balance method to reinforced concrete intermediate moment frame which was designed based on SNI 1726:2019 and SNI 2847:2019. After the dimensions and reinforcement configurations of the beams and columns were obtained, pushover analysis was conducted to obtain capacity curve. By using pushover analysis, the structure's performance point was generated which was immediate occupancy. After that, capacity curve was converted to energy capacity curve. The intersection point between energy capacity curve and energy demand curve which was obtained from the energy balance equation showed maximum roof displacement at a certain seismic level. To predict pseudo acceleration value, S_a that cause the building to collapse and maximum roof displacement before the building collapse, the energy demand curve was scaled up until the end of the energy demand curve intersect the end of the energy capacity curve. NLTHA with three ground motions that had been scaled based on SNI 1726:2019 procedure was conducted to prove the accuracy of energy balance method results. Each S_a value of the three ground motions was scaled up to the S_a value that caused the building to collapse in energy balance method to find out whether the building would collapse with the scaled-up ground motions. The applied energy balance method generated a S_a value of 1,02101g that caused the building collapse with a maximum roof displacement of 0,16 m before the building collapsed, maximum roof displacement in 2/3 MCE earthquake which is 0,053 m and 0,068 m in MCE earthquake. The value of S_a collapse and maximum roof displacement value before the building collapse were much bigger than the value of S_a and maximum roof displacement in 2/3 MCE and MCE earthquake, which meant the structure had much bigger capacity than the required strength. NLTHA results showed that with the scaled-up ground motions, beams of the structure experienced failure. Furthermore, the inter-story drift of the three ground motions that had been scaled up had similar values with the energy balance method inter-story drift. Therefore, this study shows that the energy balance method is quite accurate in collapse prediction of a reinforced concrete intermediate moment frame.

Keywords: Energy Balance Method, Collapse Prediction, Pushover Analysis, Non-linear Time History Analysis

PRAKATA

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas kasih karunia dan anugerah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul Evaluasi Desain dan Prediksi Struktur Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Menengah Menggunakan Metode Keseimbangan Energi dengan baik. Skripsi ini merupakan salah satu persyaratan akademik sekaligus pembelajaran yang perlu dilalui agar memperoleh gelar sarjana di Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil, Universitas katolik Parahyangan.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis mendapat banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari beberapa pihak sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis yang memberikan semangat dan doa, serta dukungan secara moral dan materiil selama proses pengerjaan skripsi.
2. Bapak Helmy Hermawan Tjahjanto, Ph.D. selaku dosen pembimbing dan Bapak Wisena Perceka, Ph.D. selaku dosen ko-pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk membimbing, menuntun, mengajar, dan memberikan wawasan dan saran kepada penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Bapak Dr. Paulus Karta Wijaya dan Ibu Dr.-Ing. Dina Rubiana Widarda selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan, kritik, dan saran untuk membantu penulis dalam menyempurnakan skripsi ini.
4. Seluruh dosen dan staff pengajar Teknik Sipil UNPAR yang telah memberikan banyak ilmu selama penulis menjalani masa perkuliahan.
5. Seluruh teman-teman dan sahabat yang telah memberikan semangat dan dukungan selama penulis menjalani masa perkuliahan dan juga dalam proses penulisan skripsi ini.
6. Seluruh teman-teman angkatan 2017 dan 2018 Teknik Sipil UNPAR yang sudah menemani dan memberikan dukungan selama penulis menjalani perkuliahan.

7. Seluruh pihak lainnya yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis selama masa perkuliahan maupun dalam proses penulisan skripsi.

Penulis berharap arar skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dalam pembelajaran dan perkembangan ilmu Teknik Sipil baik secara akademis dan praktek dalam mengevaluasi desain dan memprediksi keruntuhan suatu struktur bangunan. Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari sempurna mengingat keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sehingga penulis menerima kritik dan sara yang membangun guna menyempurnakan karya ilmiah penulis berikutnya.

Jakarta, 10 Januari 2022



Angela Maudy
6101810173



DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1-1
1.1 Latar Belakang	1-1
1.2 Inti Permasalahan	1-3
1.3 Tujuan Penulisan	1-3
1.4 Pembatasan Masalah	1-4
1.5 Metode Penelitian	1-5
1.6 Sistematika Penulisan	1-6
BAB 2 STUDI LITERATUR	2-1
2.1 Pembebanan Struktur Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa (SNI 1726:2019)	2-1
2.1.1 Penentuan Beban Gravitasi	2-1
2.1.2 Penentuan Beban Gempa	2-1
2.2 Perencanaan Sistem Rangka Pemikul Momen Bertulang (SNI 2847:2019)	2-23
2.2.1 Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah	2-23
2.2.2 Perencanaan Balok pada Struktur Beton Bertulang Pemikul Momen Menengah (SNI 2847:2019)	2-24

2.2.3	Perencanaan Kolom pada Struktur Beton Bertulang Pemikul Momen Menengah (SNI 2847:2019).....	2-26
2.3	Analisis Beban Dorong	2-28
2.3.1	Level Kinerja Struktur.....	2-36
2.4	Analisis Riwayat Waktu Respons Nonlinier	2-37
2.4.1	Persyaratan Umum	2-37
2.4.2	Gerakan Tanah Dasar	2-38
2.4.3	Pemodelan dan Analisis	2-40
2.4.4	Hasil Analisis dan Kriteria Penerimaan	2-42
2.5	Sendi Plastis	2-45
2.6	Metode Keseimbangan Energi	2-47
2.6.1	Konsep Metode Keseimbangan Energi.....	2-47
2.6.2	Evaluasi Seismik dan Prediksi Keruntuhan	2-50
BAB 3 PERENCANAAN STRUKTUR.....		3-1
3.1	Data Struktur	3-1
3.2	Pemodelan Struktur.....	3-2
3.3	Data Pembebanan.....	3-3
3.4	Periode Fundamental dan Partisipasi Massa	3-6
3.5	Pemeriksaan Ketidakberaturan.....	3-7
3.5.1	Ketidakteraturan Horizontal.....	3-7
3.5.2	Ketidakteraturan Vertikal.....	3-8
3.6	Pengaruh P-delta.....	3-9
3.7	Faktor Skala.....	3-9
3.8	Pengecekan Simpangan Antar Tingkat	3-10
3.9	Perencanaan Elemen Struktur.....	3-11
3.9.1	Penulangan Balok.....	3-11

3.9.2	Penulangan Kolom	3-12
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN		4-1
4.1	Analisis Beban Dorong	4-1
4.1.1	Pemodelan Sendi Plastis	4-1
4.1.2	Hasil Analisis Beban Dorong.....	4-6
4.1.3	Performance Point.....	4-7
4.2	Metode Keseimbangan Energi	4-8
4.3	Analisis Riwayat Waktu Respons Nonlinier	4-14
4.3.1	Karakteristik Gempa	4-14
4.3.2	Analisis Keruntuhan dengan Analisis Riwayat Waktu Respons Nonlinier	4-18
4.4	Interstory Drift.....	4-28
4.4.1	Perbandingan Interstory Drift Metode Keseimbangan Energi dan Analisis Riwayat Waktu Respons Nonlinier.....	4-28
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		5-1
5.1	Kesimpulan.....	5-1
5.2	Saran.....	5-2
DAFTAR PUSTAKA.....		xvii
LAMPIRAN 1		L1-1
LAMPIRAN 2.....		L2-1
LAMPIRAN 3.....		L3-1
LAMPIRAN 4.....		L4-1
LAMPIRAN 5.....		L5-1

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

- A_g : luas bruto penampang bruto (mm)
- A_x : faktor amplifikasi torsi
- b_w : lebar badan (mm)
- C_d : faktor pembesaran defleksi
- C_s : koefisien respons seismik
- C_u : koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung
- D : pengaruh beban mati
- d : jarak dari serat tekan terjau ke pusat tulangan tarik longitudinal (mm)
- d' : jarak dari serat tekan terjau ke pusat tulangan tekan longitudinal (mm)
- E : pengaruh gaya gempa horizontal dan vertikal
- E_c : modulus elastisitas beton (MPa)
- E_e : komponen elastis struktur
- E_h : beban seismik horizontal
- E_{mh} : pengaruh beban seismik horizontal dengan faktor kuat lebih
- E_p : komponen plastis dari energi yang dibutuhkan untuk mendorong struktur sejauh simpangan yang ditargetkan
- E_s : modulus elastisitas baja (MPa)
- E_v : pengaruh beban seismik horizontal dengan faktor kuat lebih
- F_a : faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek
- F_v : faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik

- f'_c : kuat tekan beton (MPa)
- f'_y : kuat leleh tulangan (MPa)
- h : tebal atau tinggi keseluruhan struktur (mm)
- h_n : ketinggian struktur (m)
- h_{sx} : tinggi tingkat di bawah tingkat-x (mm)
- I_e : faktor keutamaan gempa
- l_o : panjang yang diukur dari muka *joint* sepanjang sumbu komponen struktur,
di mana tulangan transversal khusus harus disediakan (mm)
- M : massa dari sistem struktur
- M_n : kekuatan lentur nominal pada penampang (Nmm)
- MCE : gempa maksimum yang dipertimbangkan
- MCE_R : gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget
- N : beban aksial terbesar (N)
- P : total gaya gravitasi (N)
- Q_E : pengaruh gaya seismik horizontal yang dihasilkan dari penerapan gaya
horizontal secara serentak dalam dua arah tegak lurus satu sama lain
- R : koefisien modifikasi respons
- R_μ : faktor reduksi daktilitas
- S_a : respons spektra percepatan (g)
- S_d : spektral *demand* (g)
- S_{D1} : parameter percepatan spektral desain pada periode 1 detik (g)
- S_{DS} : parameter percepatan spektral desain pada periode pendek (g)
- S_{MS} : parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (g)

- S_{M1} : parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik (g)
- S_o : spasi pusat ke pusat tulangan transversal dalam panjang l_o (mm)
- S_S : percepatan baruan dasar pada periode pendek, $T = 0,2$ s (g)
- S_v : kecepatan spektral yang didapat dari respon spektrum elastis
- S_1 : percepatan batuan dasar pada periode 1 detik, $T = 1$ s (g)
- T_a : periode fundamental pendekatan (detik)
- T_L : peta transisi periode panjang (detik)
- T_L : peta transisi periode panjang (detik)
- U_r : simpangan atap (m)
- U_y : simpangan leleh (m)
- V : gaya dasar seismik
- V_{col} : kekuatan geser kolom (N)
- V_n : kekuatan geser nominal (N)
- V_n : kekuatan geser nominal (N)
- V_S : kekuatan geser nominal yang diberikan oleh penulangan geser (N)
- V_y : gaya geser akibat momen leleh (N)
- W : berat seismik efektif
- δ_{avg} : rata-rata perpindahan di titik-titik terjauh struktur di tingkat-x (mm)
- δ_{max} : perpindahan maksimum di tingkat-x (mm)
- δ_x : simpangan pusat massa di tingkat-x
- δ_{xe} : simpangan di tingkat-x yang ditentukan dengan analisis elastik
- μ : faktor daktilitas simpangan
- ρ : faktor redundansi

ϕ : faktor reduksi kekuatan

Ω_0 : faktor kuat lebih sistem



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema Evaluasi Seismik dan Prediksi Keruntuhan dengan Metode Keseimbangan Energi. (a) Kurva Beban Dorong, (b) Kurva Energy Capacity, (c) Kurva Energy Demand, (d) Gabungan Kurva Energy Capacity dan Kurva Energy Demand untuk Evaluasi Seismik dan Prediksi Keruntuhan (sumber: Liao et al., 2017)	1-3
Gambar 1.2 Konfigurasi Horizontal Struktur.....	1-4
Gambar 1.3 Konfigurasi Verikal Struktur.....	1-5
Gambar 2.1 Parameter Gerak Tanah, S_s	2-5
Gambar 2.2 Parameter Gerak Tanah, S_1	2-6
Gambar 2.3 Spektrum Respons Desain.....	2-8
Gambar 2.4 Peta Transisi Periode Panjang, T_L	2-9
Gambar 2.5 Faktor Pembesaran Torsi, A_x	2-14
Gambar 2.6 Penentuan Simpangan Antar Tingkat.....	2-19
Gambar 2.7 Kurva Kapasitas	2-29
Gambar 2.8 Kurva Respons Spektrum (S_a vs T).....	2-30
Gambar 2.9 Kurva ADRS (S_a vs S_d).....	2-30
Gambar 2.10 Kurva Kapasitas	2-31
Gambar 2.11 Kurva Spektrum Kapasitas.....	2-32
Gambar 2.12 Kurva Respon Spektrum dengan Redaman Berbeda-beda	2-32
Gambar 2.13 Kurva Respons Spektrum dan Kurva Respon Kapasitas	2-33
Gambar 2.14 Representasi Bilinear.....	2-33
Gambar 2.15 Respon Spektrum dengan Titik d_{pi}, β_o	2-35
Gambar 2.16 Garis yang Menghubungi Titik d_{pi}, β_o	2-35
Gambar 2.17 Kurva Gaya-Deformasi	2-45
Gambar 2.18 Faktor Energi sebagai Fungsi dari Periode	2-48
Gambar 2.19 Faktor Reduksi Daktilitas sebagai Fungsi dari Periode	2-49
Gambar 2.20 Konsep Keseimbangan Energi	2-49
Gambar 3.1 Model 3 Dimensi Bangunan.....	3-2
Gambar 3.2 Denah Tipikal Bangunan.....	3-3
Gambar 3.3 Detail Penulangan Balok.....	3-11

Gambar 3.4 Detail Penulangan Kolom 50/50	3-16
Gambar 3.5 Detail Penulangan Kolom 60/60	3-16
Gambar 4.1 Kurva Momen-Rotasi Balok	4-2
Gambar 4.2 Kurva Momen Rotasi Kolom 60/60 untuk $P = 3542,96$ kN	4-3
Gambar 4.3 Kurva Momen-Rotasi Kolom 60/60 untuk $P = 1000$ kN	4-4
Gambar 4.4 Kurva Momen-Rotasi Kolom 50/50 untuk $P = 785,49$ kN	4-5
Gambar 4.5 Kurva Momen-Rotasi Kolom 50/50 untuk $P = 400$ kN	4-5
Gambar 4.6 Kurva Kapasitas	4-6
Gambar 4.7 Momen Sendi Plastis Analisis Beban Dorong	4-7
Gambar 4.8 Kurva S_a vs S_d	4-8
Gambar 4.9 Pembagian Bidang Kurva Energy Kapasitas	4-9
Gambar 4.10 Kurva Energi Kapasitas.....	4-10
Gambar 4.11 Penentuan Simpangan Leleh.....	4-11
Gambar 4.12 Kurva <i>Energy Demand</i> dan <i>Energy Capacity</i>	4-12
Gambar 4.13 <i>Energy Demand Collapse</i>	4-13
Gambar 4.14 S_a vs T untuk Gempa Chichi.....	4-15
Gambar 4.15 S_a vs T untuk Gempa Chichi dengan S_a <i>Collapse</i>	4-15
Gambar 4.16 S_a vs T untuk Gempa Darfield.....	4-16
Gambar 4.17 S_a vs T untuk Gempa Darfield dengan S_a <i>Collapse</i>	4-16
Gambar 4.18 S_a vs T untuk Gempa Imperial Valley	4-17
Gambar 4.19 S_a vs T untuk Gempa Imperial Valley dengan S_a <i>Collapse</i>	4-18
Gambar 4.20 Momen Sendi Plastis Kolom (Gempa Chichi).....	4-18
Gambar 4.21 Momen Sendi Plastis Balok (Gempa Chichi)	4-19
Gambar 4.22 Momen Sendi Plastis Gempa Chichi pada S_a Kedua Terbesar....	4-20
Gambar 4.23 Sendi Plastis Kolom (Gempa Chichi Diperbesar).....	4-20
Gambar 4.24 Sendi Plastis Balok (Gempa Chichi Diperbesar)	4-21
Gambar 4.25 Sendi Plastis Kolom (Gempa Darfield).....	4-22
Gambar 4.26 Sendi Plastis Balok (Gempa Darfield)	4-22
Gambar 4.27 Momen Sendi Plastis Gempa Darfield pada S_a Kedua Terbesar .	4-23
Gambar 4.28 Sendi Plastis Kolom (Gempa Darfield Diperbesar)	4-24
Gambar 4.29 Sendi Plastis Balok (Gempa Darfield Diperbesar).....	4-24
Gambar 4.30 Sendi Plastis Kolom (Gempa Imperial Valley).....	4-25

Gambar 4.31 Sendi Plastis Balok (Gempa Imperial Valley)	4-25
Gambar 4.32 Momen Sendi Plastis Gempa Imperial Valley pada Sa Kedua Terbesar	4-26
Gambar 4.33 Sendi Plastis Kolom (Gempa Imperial Valley Diperbesar)	4-27
Gambar 4.34 Sendi Plastis Balok (Gempa Imperial Valley Diperbesar).....	4-27
Gambar 4.35 Perbandingan Interstory Drift pada Gempa MCE.....	4-29
Gambar 4.36 Perbandingan Interstory Drift pada Sa Gempa yang Diperbesar .	4-30



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa	2-2
Tabel 2.2 Faktor Keutamaan Gempa	2-4
Tabel 2.3 Klasifikasi Situs	2-4
Tabel 2.4 Koefisien Situs, F_a	2-6
Tabel 2.5 Koefisien situs, F_v	2-7
Tabel 2.6 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek	2-9
Tabel 2.7 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik	2-10
Tabel 2.8 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur	2-10
Tabel 2.9 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur	2-12
Tabel 2.10 Koefisien untuk Batas Atas Periode yang Dihitung.....	2-16
Tabel 2.11 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x	2-17
Tabel 2.12 Simpangan Antar Tingkat Izin	2-20
Tabel 2.13 Faktor R , C_d , Ω_o untuk sistem beton bertulang pemikul gaya seismik	2-23
Tabel 2.14 Tinggi Minimum Balok Nonprategang, h	2-24
Tabel 2.15 Persyaratan Maksimum Spasi Tulangan Geser.....	2-27
Tabel 2.16 Level Kinerja Struktur	2-36
Tabel 2.17 Faktor Beban untuk Perilaku yang Dikontrol Gaya.....	2-44
Tabel 2.18 Faktor Tahanan Sesimik untuk Aksi yang Dikontrol Kritis dan Biasa	2-44
Tabel 2.19 Nilai a , b , c untuk Balok	2-46
Tabel 3.1 Data Dimensi Elemen Struktur	3-2
Tabel 3.2 Beban Mati Tambahan pada Pelat	3-3
Tabel 3.3 Beban Hidup pada Pelat	3-4
Tabel 3.4 Modal Participation Masses	3-6
Tabel 3.5 Periode Fundmantel Struktur dari Midas	3-6
Tabel 3.6 Faktor Pembesaran Torsi	3-7

Tabel 3.8 Pengecekan Ketidakberaturan Tipe 5b	3-9
Tabel 3.9 Pengecekan Koefisien Stabilitas	3-9
Tabel 3.10 Gaya Geser Dasar Gempa Statik dan Dinamik	3-10
Tabel 3.11 Pengecekan Simpangan Antar Tingkat	3-10
Tabel 3.12 Penulangan Balok	3-11
Tabel 3.13 Nilai $\mu/\phi M_n$ pada Desain Balok	3-11
Tabel 3.14 Beban Terfaktor Kolom 60x60 cm	3-12
Tabel 3.15 Beban Terfaktor Kolom 50x50 cm	3-13
Tabel 3.16 Tulangan Longitudinal Kolom	3-13
Tabel 3.17 Diagram Interaksi Kolom 60/60	3-14
Tabel 3.18 Diagram Interaksi Kolom 50/50	3-15
Tabel 4.1 Nilai Momen-Rotasi Balok	4-1
Tabel 4.2 Nilai Momen-Rotasi Kolom 60/60 untuk $P = 3542,96$ kN	4-2
Tabel 4.3 Nilai Momen-Rotasi Kolom 60/60 untuk $P = 1000$ kN	4-3
Tabel 4.4 Nilai Momen-Rotasi Kolom 50/50 untuk $P = 785,49$ kN	4-4
Tabel 4.5 Nilai Momen-Rotasi Kolom 50/50 untuk $P = 400$ kN	4-4
Tabel 4.6 Performance Point	4-7
Tabel 4.7 Tabel Perhitungan Energi Kapasitas	4-9
Tabel 4.8 Perhitungan <i>Energy Demand</i>	4-10
Tabel 4.9 Energy Demand Collapse	4-13
Tabel 4.10 Perhitungan Interstory Drift	4-28
Tabel 4.11 Interstory Drift Gempa Imperial Valley	4-28
Tabel 4.12 Interstory Drift Gempa Chichi	4-29
Tabel 4.13 Interstory Drift Gempa Darfield	4-29

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan daerah yang rawan bencana terutama gempa bumi karena berada di wilayah *ring of fire* yang merupakan deretan gunung berapi pasifik. Oleh karena itu, bangunan di Indonesia harus direncanakan sebagai bangunan tahan gempa sesuai dengan SNI 1726:2019 mengenai “Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung”. SNI membagi kategori desain seismik (KDS) dari bangunan tahan gempa menjadi empat kategori yaitu, KDS A, KDS B, KDS C, dan KDS D, yang tergantung dari kategori risiko dan parameter respons spektral percepatan desain S_{DS} dan S_{D1} . KDS merupakan tingkat resiko gempa di mana semakin tinggi huruf dari KDS, semakin tinggi juga resiko gempa yang akan terjadi dan bangunan dituntut untuk semakin daktail. Tabel 12 SNI 1726:2019 berisi tentang ketentuan mengenai batasan tinggi struktur pada setiap jenis rangka pemikul momen. Pada daerah dengan KDS C, diizinkan pembangunan struktur beton bertulang pemikul momen menengah dan tidak ada batasan ketinggian struktur, yang berarti struktur tidak terlalu dituntut untuk berperilaku daktail penuh. Selain itu, sudah banyak juga dikembangkan metode analisis struktur gedung tahan gempa yang dapat digunakan dan sudah diatur pada peraturan-peraturan terkait perencanaan bangunan tahan gempa.

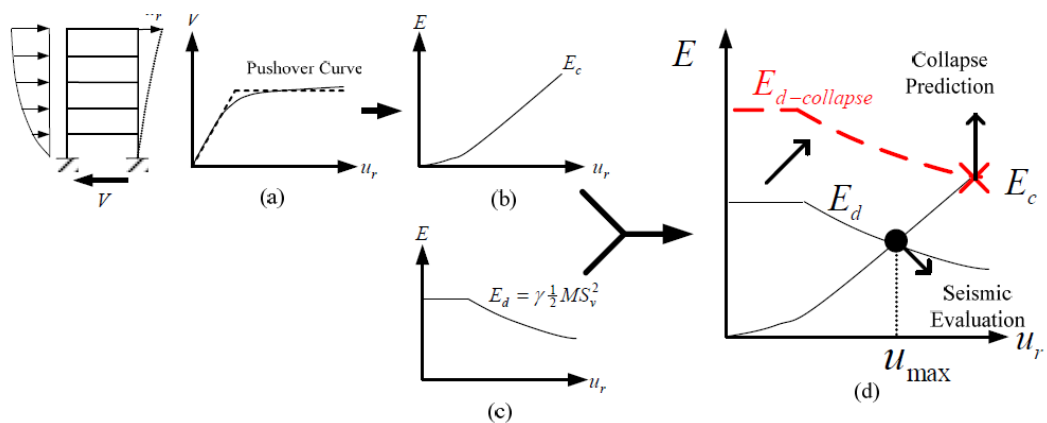
Salah satu cara analisis gedung tahan gempa adalah dengan analisis nonlinier. Analisis nonlinier yang paling sederhana adalah analisis beban dorong. *Incremental Dynamic Analysis (IDA)* merupakan prosedur dinamik nonlinier yang sering digunakan dan sudah diusulkan di dalam peraturan FEMA P695. Selain itu, analisis riwayat waktu respons nonlinier juga merupakan metode analisis dinamik nonlinier yang sering digunakan di Indonesia dan sudah diatur dalam SNI 1726:2019. Akan tetapi, baik metode IDA maupun analisis riwayat waktu respons nonlinier memerlukan waktu yang lama, terutama pada analisis bangunan tinggi. Oleh karena itu, pengembangan dari analisis nonlinier yang saat ini sudah

dikembangkan untuk mengevaluasi desain struktur dan memprediksi keruntuhan adalah metode keseimbangan energi yang prosesnya lebih sederhana dibandingkan dengan metode konvensional seperti IDA dan analisis riwayat waktu respons nonlinier.

Metode keseimbangan energi telah terbukti akurat oleh studi yang dilakukan oleh Liao dari *National Taiwan University* (Liao et al., 2017) yang menganalisis struktur rangka beton bertulang pemikul momen khusus dan Leelataviwat dari *King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand* (Leelataviwat et al., 2008) yang menganalisis struktur rangka baja. Kedua studi tersebut membandingkan hasil evaluasi seismik dari metode keseimbangan energi dengan metode IDA dan analisis riwayat waktu respons nonlinier. Kedua studi tersebut menyimpulkan bahwa metode keseimbangan energi cukup akurat dalam mengevaluasi seismik dan memprediksi keruntuhan bangunan karena hasilnya cukup dekat dengan hasil yang diperoleh dari metode dinamik nonlinier yang biasa digunakan.

Konsep dari penggunaan metode keseimbangan energi dalam evaluasi desain dan prediksi keruntuhan bangunan akibat gempa adalah dengan mendapatkan simpangan maksimum dan percepatan gempa yang dihasilkan oleh titik pertemuan antara kurva *energy capacity* dan *energy demand*. *Energy capacity* merupakan energi yang diserap atau usaha yang diperlukan untuk mendorong struktur sejauh simpangan yang ditargetkan, sedangkan *energy demand* merupakan energi yang diperlukan sebuah struktur yang disetarakan dengan sistem SDOF untuk mencapai simpangan yang ditargetkan (Liao et al., 2017). Kedua jenis energi tersebut membentuk persamaan keseimbangan energi.

Kurva *energy capacity* (Gambar 1.1 (b)) berasal dari kurva yang dihasilkan dari analisis beban dorong (Gambar 1.1 (a)) dan kurva *energy demand* (Gambar 1.1 (c)) didapatkan dari persamaan keseimbangan energi. Titik potong antara kurva *energy capacity* dan *energy demand* (Gambar 1.1 (d)) menunjukkan simpangan maksimum gedung pada tingkatan gempa tertentu. Kemudian, untuk memprediksi keruntuhan bangunan, kurva *energy demand* dipindahkan hingga ujung dari kurva tersebut bertemu dengan ujung kurva *energy capacity*. Titik pertemuan tersebut menunjukkan simpangan pada saat struktur bangunan akan runtuh.



Gambar 1.1 Skema Evaluasi Seismik dan Prediksi Keruntuhan dengan Metode Keseimbangan Energi. (a) Kurva Beban Dorong, (b) Kurva Energy Capacity, (c) Kurva Energy Demand, (d) Gabungan Kurva Energy Capacity dan Kurva Energy Demand untuk Evaluasi Seismik dan Prediksi Keruntuhan (sumber: Liao et al., 2017)

1.2 Inti Permasalahan

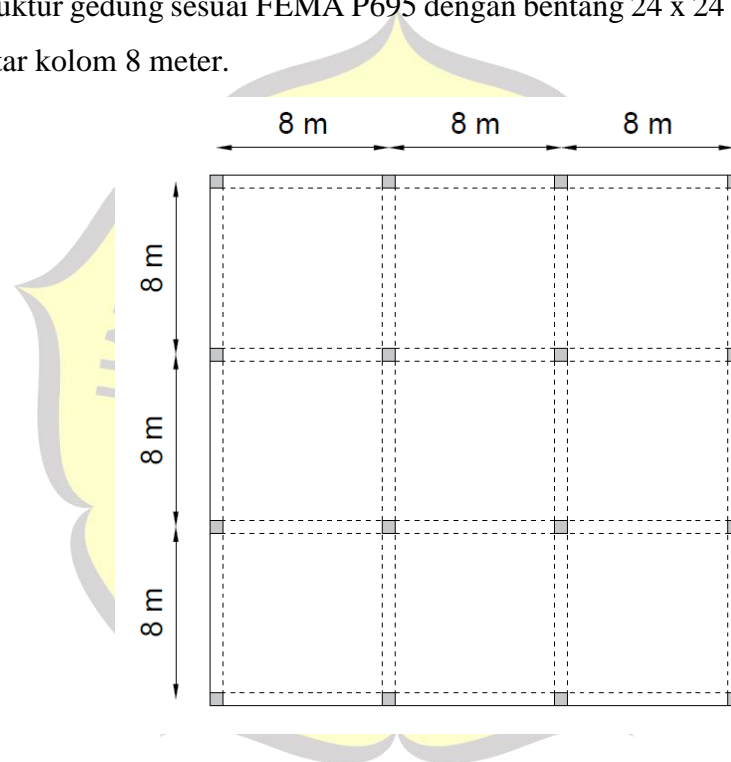
Metode keseimbangan energi sebelumnya sudah diterapkan pada studi lain untuk struktur rangka beton bertulang pemikul momen khusus dan hasil analisis cukup akurat. Akan tetapi, belum ada studi yang menerapkan metode ini untuk struktur rangka beton bertulang pemikul momen menengah. Oleh karena itu, studi mengenai evaluasi keruntuhan struktur rangka beton bertulang pemikul momen menengah dengan metode keseimbangan energi akan dilakukan pada skripsi ini dan hasil analisis akan dibandingkan dengan metode analisis riwayat waktu respons nonlinier untuk membuktikan keakuratan dari metode keseimbangan energi yang diterapkan pada studi ini.

1.3 Tujuan Penulisan

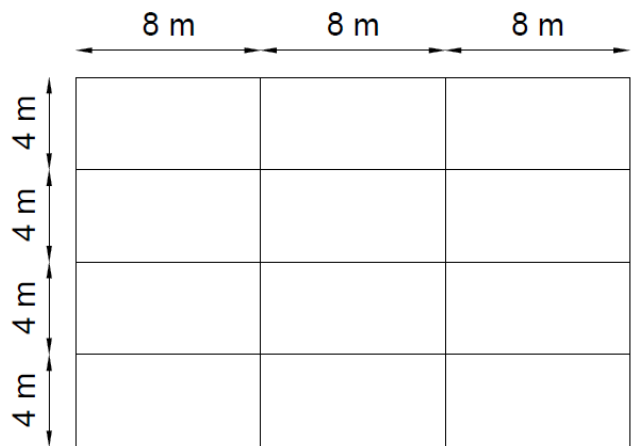
1. Merencanakan struktur beton bertulang pemikul momen menengah sesuai dengan peraturan-peraturan terkait yang berlaku di Indonesia.
2. Melakukan analisis keruntuhan dengan metode keseimbangan energi.
3. Membandingkan hasil analisis metode keseimbangan energi dengan metode analisis riwayat waktu respons nonlinier.

1.4 Pembatasan Masalah

1. Objek yang dianalisis adalah gedung dengan struktur rangka beton bertulang pemikul momen menengah (SRPMM) di Kecamatan Tarakan Tengah, Kota Tarakan dengan klasifikasi situs tanah keras (SC) dan kategori desain seismik C.
2. Fungsi dari bangunan adalah bangunan perkantoran.
3. Jumlah lantai bangunan sebanyak empat lantai dengan tinggi tingkat empat meter.
4. Konfigurasi horizontal struktur merupakan modifikasi dari prototipe struktur gedung sesuai FEMA P695 dengan bentang 24 x 24 m dengan jarak antar kolom 8 meter.



Gambar 1.2 Konfigurasi Horizontal Struktur



Gambar 1.3 Konfigurasi Verikal Struktur

5. Desain pondasi tidak dilakukan.
6. Material yang digunakan adalah beton normal dengan $f_c' = 30$ MPa dan tulangan baja dengan $f_y = 420$ MPa.
7. Analisis struktur dilakukan secara tiga dimensi dengan menggunakan *software* Midas Gen 2021.
8. Metode analisis riwayat waktu respons nonlinier yang digunakan sebagai pembanding menggunakan rekaman gerakan tanah yang sudah diskalakan.
9. Peraturan desain struktur yang digunakan:
 - SNI 1726:2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung.
 - SNI 1727:2020 tentang beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain.
 - SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan.

1.5 Metode Penelitian

1. Studi Literatur

Studi literatur yang digunakan sebagai referensi dari skripsi ini berupa makalah ilmiah, buku teks, dan peraturan-peraturan desain struktur terkait.

2. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur beton bertulang pemikul momen menengah dilakukan dengan *software* Midas Gen 2021.

3. Analisis Struktur

Menganalisis struktur menggunakan analisis riwayat waktu respons nonlinier, metode beban dorong, dan metode keseimbangan energi.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi berjudul “Evaluasi Desain dan Prediksi Keruntuhan Struktur Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Menengah Menggunakan Metode Keseimbangan Energi” adalah sebagai berikut:

Bab 1. Pendahuluan

Membahas mengenai latar belakang, inti permasalahan, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2. Studi Literatur

Membahas mengenai konsep dan prinsip dasar dalam penulisan dari skripsi ini.

Bab 3. Perencanaan Struktur.

Memodelkan struktur dengan *software* Midas Gen 2021 dan menguraikan elemen penyusun dari struktur tersebut.

Bab 4. Analisis dan Pembahasan

Menganalisis hasil dari pemodelan struktur dan melakukan perhitungan yang diperlukan untuk mengevaluasi desain struktur dan memprediksi keruntuhan struktur.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

Menyimpulkan hal yang didapat dari hasil analisis dan memberikan saran kepada skripsi ini maupun penelitian yang akan dilakukan ke depannya.