

**SKRIPSI**

**STUDI KASUS *RETROFITTING* STRUKTUR RANGKA  
GEDUNG BETON BERTULANG PASCA KEBAKARAN  
DENGAN BREISING BAJA KONSENTRIS EKSTERNAL**



**ANINDYA SULAKSANI APSARI**

**NPM : 6101801200**

**PEMBIMBING : Dr. Johannes Adhijoso Tjondro**

**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**  
**STUDI KASUS *RETROFITTING* STRUKTUR RANGKA GEDUNG**  
**BETON BERTULANG PASCA KEBAKARAN DENGAN**  
**BREISING BAJA KONSENTRIS EKSTERNAL**



**NAMA: ANINDYA SULAKSANI APSARI**  
**NPM: 6101801200**

**PEMBIMBING:** Dr. Johannes Adhijoso Tjondro.

**KO-  
PEMBIMBING:** -

**PENGUJI 1:** Helmy Hermawan Tjahjanto, S.T,  
M.T., Ph.D.

**PENGUJI 2:** Lidya Fransisca Tjong, Ir., M.T.

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**  
**FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**  
**(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT No.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 : .Anindya Sulaksana Apsari

NPM : 6101801200

Program Studi : Teknik Sipil

Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa skripsi / tesis / disertasi<sup>1)</sup> dengan judul:

Studi Kasus *Retrofitting* Struktur Rangka Gedung Beton Bertulang Pasca Kebakaran dengan Breising Baja Konsentris Eksternal

adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan dosen 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 Bandung

Tanggal: 11/1/2021



Anindya Sulaksana Apsari  
(6101801200)

<sup>1)</sup> coret yang tidak perlu

# STUDI KASUS *RETROFITTING* STRUKTUR RANGKA GEDUNG BETON BERTULANG PASCA KEBAKARAN DENGAN BREISING BAJA KONSENTRIS EKSTERNAL

Anindya Sulaksana Apsari

NPM: 6101801200

Pembimbing : Dr. Johannes Adhijoso Tjondro

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

Kebakaran gedung dapat disebabkan oleh berbagai hal seperti arus listrik yang pendek, tindak kriminalitas, meledaknya tabung gas, dan lain-lain. Kebakaran dapat menyebabkan material beton mengalami perubahan pada sifat dan kekuatan struktur. Gedung beton pasca kebakaran tidak selamanya harus langsung dihancurkan atau dibongkar, karena elemen struktur bangunan yang mengalami kebakaran masih memiliki kekuatan sisa. Penurunan kekuatan elemen struktur tersebut dapat membuat struktur tidak kuat untuk menopang beban gempa dan beban gravitasi sehingga balok, kolom, dan pelat perlu perkuatan agar dapat meningkatkan kekuatan struktur sehingga dapat memikul beban seperti semula. Perkuatan struktur atau *Retrofitting* memiliki fungsi untuk meningkatkan kekuatan lateral struktur dan daktilitas struktur. Pemodelan struktur eksisting pada skripsi ini adalah rangka beton bertulang 6 lantai dengan daktilitas penuh. *Retrofitting* global struktur tersebut dilakukan dengan penambahan breising baja konsentris khusus dengan konfigurasi *multistory X* dan *retrofitting* lokal dengan menambah tulangan pada kolom. Keperluan *retrofitting* dilakukan sesuai dengan ketiga kasus yang dilakukan. Setelah *retrofit*, struktur akan dianalisis secara elastis dengan analisis ragam dan inelastic riwayat waktu.

Jika dianalisis secara elastis, ketiga model memiliki hasil yang baik, yaitu dimana drift dan luas tulangan perlu lebih besar daripada luas tulangan terpasang. Namun ketika dilakukan analisis inelastis menggunakan percepatan gempa El-Centro N-S tahun 1940, Denpasar B-T tahun 1979, Flores tahun 1992, Parkfield N65E tahun 1966, dan Bucharest N-S tahun 1977 yang sudah di skalakan terhadap respon spektrum, kegagalan terjadi pada Model 1 dan Model 3. Sehingga diperlukan *retrofitting* lokal pada Model 1 dan Model 3. Setelah berhasil maka didapatkan faktor kuat lebih ( $\Omega_0$ ) untuk Model 1 sebesar 4,751, untuk Model 2 sebesar 5,030, dan 5,091 untuk Model 3 dan faktor Pembesaran defleksi (Cd) dari ketiga model adalah sebesar 1,170 pada Model 1, 0,938 pada Model 2, dan 1,197 pada Model 3. Sedangkan untuk taraf kinerja gedung setelah diberikan retrofit mengalami peningkatan yang semulanya gedung mengalami kegagalan. Pada model 1, untuk kelima percepatan gempa yaitu El Centro, Parkfield, Bucharest, dan Denpasar menjadi *Life Safety*. Pada model 2 tingkat kinerja dipilih yang paling kritis dari kedua arah analisis riwayat waktu sehingga untuk gempa El Centro, Parkfield, dan Bucharest menjadi *Life Safety* sedangkan untuk Denpasar dan Flores menjadi *Immediate Occupancy*. Pada model 3, untuk El Centro, Bucharest, dan Flores menjadi *Life Safety* sedangkan untuk Parkfield dan Denpasar menjadi *Immediate Occupancy*.

Kata kunci : retrofitting, breising konsentris, analisis riwayat waktu, sendi plastis, tingkat kinerja

# **CASE STUDY ON THE BEHAVIOR OF POST FIRE REINFORCED CONCRETE FRAME RETROFITTED USING EXTERNAL CONCENTRICALLY STEEL BRACE FRAMES**

**Anindya Sulaksana Apsari**

**NPM: 6101801200**

**Advisor : Dr. Johannes Adhijoso Tjondro**

**PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY  
FACULTY OF ENGINEERING DEPARTEMENT OF CIVIL ENGINEERING**

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

**BANDUNG**

**JANUARY 2022**

## **ABSTRACT**

Fire building can caused by many things such as short circuit electricity, criminality, exploded gas, etc. Other than that fire building can affect the behavior and decreasing the strength of concrete element. Post fire building do not always have to be directly destroyed because the structural elements that have experienced a fire still have residual strength. Because of the increasing strength of the structural elements, the structure is not strong enough to support earthquake loads and gravity loads so that beams, columns, and plates need reinforcement in order to increase the strength of the structure so that they can carry the load as before. Retrofitting has a function to increase the lateral strength of the structure and the ductility of the structure. The modeling of the existing structure in this thesis is a 6-story reinforced concrete frame with full ductility. The retrofitting of the structure was carried out by adding special concentric steel braces with a multistory X configuration and local retrofitting by adding reinforcement to the column. The need for retrofitting was carried out according to the three cases. After retrofitting, the structure will be analyzed elastically using modal analysis and inelastically using time history analysis.

When analyzed elastically, the three models have good results, namely where the drift and reinforcement area is greater than the installed reinforcement area. However, when an inelastic analysis was carried out using the earthquake accelerations such as El-Centro NS 1940, Denpasar BT in 1979, Flores in 1992, Parkfield N65E in 1966, and Bucharest NS in 1977 which had been scaled to the response spectrum, failures occurred in Model 1 and Model 3. So that local retrofitting is needed on Model 1 and Model 3. After success, the stronger factor ( $\Omega_0$ ) for Model 1 is 4.751, for Model 2 is 5.030, and 5.091 for Model 3 and the deflection magnification factor ( $C_d$ ) of the three models is equal to 1.170 on Model 1, 0.938 on Model 2, and 1.197 on Model 3. Meanwhile, the level of performance of the building after being retrofitted has increased, which was originally a building failure. In model 1, the five earthquake accelerations namely El Centro, Parkfield, Bucharest, and Denpasar become Life Safety. In model 2, the most critical performance level is chosen from both directions of time history analysis so that for the El Centro, Parkfield, and Bucharest earthquakes it becomes Life Safety while for Denpasar and Flores it becomes Immediate Occupancy. In model 3, for El Centro, Bucharest, and Flores it becomes Life Safety while for Parkfield and Denpasar it becomes Immediate Occupancy.

Keywords: retrofitting, concentrically braced frames, time history analysis, plastic hinges, performances level

## PRAKATA

Puji syukur kepada Tuhan yang Maha Esa karena atah berkah dan rahmatNya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *Studi Kasus Retrofitting Struktur Rangka Geudng Beton Bertulang Pasca Kebakaran dengan Breising Baja Konsentris Eksternal*. Skripsi ini dibuat untuk melengkapi salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat S-1 di Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.

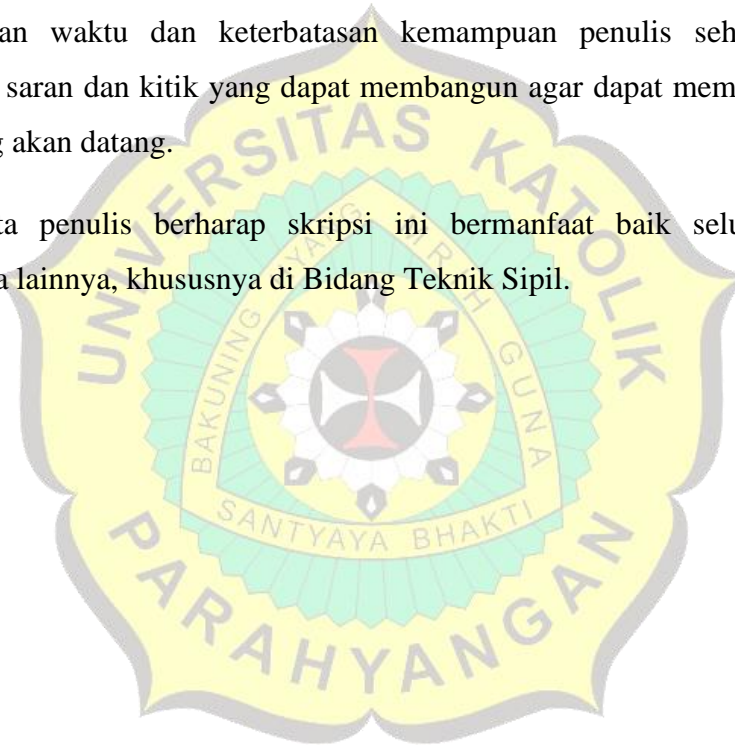
Dalam proses penyusunan skripsi, terjadi banyak hambatan dan kesulitan yang dilalui oleh penulis, sehingga dalam menyelesaikan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Joko Husodo dan Bhanun Sri dan kaka adik terkasih Menur Wulan dan Amaranggani yang senantiasa selalu mendoakan, menghibur, memberikan semangat dan dukungan agar skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Dr. Johannes Adhijoso Tjondro selaku dosen pembimbing skripsi yang telah dengan penuh kesabaran memberikan ilmu, meluangkan waktu, dan membimbing pembuatan skripsi, serta mengajarkan nilai-nilai yang berguna bagi kehidupan dalam perkuliahan maupun diluar perkuliahan.
3. Seluruh dosen dan staff pengajar KBI Struktur Universitas Katolik Parahyangan yang telah memberi saran dan kritik untuk membuat skripsi ini menjadi lebih baik.
4. Seluruh dosen dan staff pengajar Program Studi Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan yang telah memberikan ilmu kepada penulis saat menjalani studi di Universitas Katolik Parahyangan.
5. Bondan dan Jason selaku teman seperjuangan skripsi atas segala bantuan dan bertukar pikiran dalam penyusunan skripsi.

6. Teman-teman yang menemani selama masa studi di Universitas Katolik Parahyangan dan selalu memberikan bantuan dan dukungan Theo, Keyne, Agnes, Afina, Alreza, Elton, dan Ivan.
7. Seluruh teman-teman Sipil Unpar Angkatan 2018 yang telah melewati proses perkuliahan bersama serta kenangan dan kebersamaan selama ini.
8. Semua pihak yang telah membantu, memberi dukungan dan semangat selama penulisan skripsi ini.

Penulisan menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna mengingat keterbatasan waktu dan keterbatasan kemampuan penulis sehingga penulis menerima saran dan kritik yang dapat membangun agar dapat memperbaikinya di masa yang akan datang.

Akhir kata penulis berharap skripsi ini bermanfaat baik seluruh pembaca mahasiswa lainnya, khususnya di Bidang Teknik Sipil.



Jakarta, 18 Januari 2022

Penulis,

Anindya Sulaksana Apsari

6101801200

# DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT .....	v
PRAKATA .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xvi
DAFTAR TABEL .....	xxv
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 .....	1-3
1.5 Metode Penelitian .....	1-8
1.6 Sistematika Penulisan .....	1-11
BAB 2 STUDI PUSTAKA .....	2-1
2.1 SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung .....	2-1
2.1.1 Gempa Rencana .....	2-1
2.1.2 Faktor Keutamaan gempa dan kategori risiko struktur bangunan .....	2-1
2.1.3 Kombinasi beban dasar .....	2-2
2.1.4 Kombinasi beban dengan pengaruh beban Seismik .....	2-3
2.1.5 Klasifikasi Situs .....	2-4
2.1.6 Koefisien Situs dan Parameter-Parameter Percepatan Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertibangkan Risiko – Tertarget (MCER) .....	2-5
2.1.7 Parameter Percepatan Spektral Desain .....	2-8



2.1.8	Spektrum Respons Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko – Tertarget ( <i>Risk – Targeted Maximum Considered Earthquake / MCE<sub>R</sub></i> )	2-8
2.1.9	Spektrum Respons Desain	2-8
2.1.10	Kategori Desain Seismik	2-9
2.1.11	Sistem Struktur	2-10
2.1.12	Faktor Redundansi	2-11
2.1.13	Pengaruh Beban Seismik	2-12
2.1.14	Pengaruh Beban Seismik termasuk Faktor Kuat Lebih	2-13
2.1.15	Persyaratan Sistem Ganda	2-14
2.1.16	Penentuan Periode	2-14
2.1.17	Gaya Lateral Ekuivalen	2-15
2.1.18	Simpangan antar lantai	2-16
2.1.19	Pengaruh P-delta	2-18
2.1.20	Jumlah Ragam	2-19
2.1.21	Penskalaan Gaya	2-19
2.1.22	Ketidakteraturan Horizontal	2-19
2.1.23	Ketidakteraturan Vertikal	2-22
2.2	SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur lain.	2-25
2.2.1	Beban Mati	2-25
2.2.2	Beban Hidup	2-25
2.2.3	Beban Gempa	2-25
2.3	SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan	2-26
2.3.1	Desain Pelat Dua Arah	2-26
2.3.2	Desain Balok	2-26
2.3.3	Desain Kolom	2-27
2.3.4	Persyaratan Selimut Beton	2-28
2.4	<i>Retrofitting</i> Bangunan (FEMA 356)	2-28

2.4.1	Target Retrofitting.....	2-29
2.4.2	<i>Basic Safety Object</i> .....	2-30
2.4.3	Pembatasan <i>Retrofitting</i> .....	2-30
2.4.4	Tingkat dan Rentang Kinerja Struktur .....	2-31
2.5	Beton Pasca Bakar.....	2-34
2.5.1	Beton Bertulang.....	2-34
2.5.2	Sifat Beton Pada Temperatur Tinggi.....	2-34
2.5.3	Sifat Baja Tulangan Pada Temperatur Tinggi.....	2-35
2.5.4	Pengaruh Kebakaran Pada Struktur Beton Bertulang .....	2-35
2.5.5	Estimasi Penurunan Mutu Beton dan Baja Tulangan.....	2-38
2.6	Perilaku Nonlinear Struktur .....	2-40
2.7	Analisis Riwayat Waktu.....	2-41
2.8	Rekaman Percepatan Gempa.....	2-43
2.9	Penskalaan Percepatan Gempa.....	2-44
2.9.1	<i>Frequency Domain Method</i> .....	2-45
2.9.2	<i>Time Domain Method</i> .....	2-45
2.10	Metode Integrasi.....	2-45
2.11	Redaman Rayleigh .....	2-48
2.12	Sendi Plastis .....	2-49
2.13	Retrofitting dengan Breising Baja.....	2-49
2.14	Sistem Rangka Breising Konsentris Khusus.....	2-50
2.15	Persyaratan Elemen Breising .....	2-51
2.16	<i>Retrofitting</i> Lokal dengan <i>Near Surface Mounting</i> .....	2-52
BAB 3	.....	3-1
3.1	Data Bangunan .....	3-1
3.2	Data Struktur .....	3-1
3.3	Data Material.....	3-2
3.4	Pembebanan .....	3-2
3.4.1	Berat sendiri struktur.....	3-2
3.4.2	Beban mati tambahan .....	3-2

3.4.3	Beban hidup.....	3-3
3.4.4	Beban gempa .....	3-3
3.5	Kombinasi Pembebanan.....	3-5
3.6	Dimensi dan Penulangan Elemen Struktur.....	3-6
3.7	Penurunan Kekuatan Struktur .....	3-11
3.8	Studi Kasus Penurunan Kekuatan Struktur dan Retrofitting Bangunan.....	3-11
3.8.1	Model 1.....	3-11
3.8.2	Model 2.....	3-15
3.8.3	Model 3.....	3-19
3.9	<i>Retrofitting</i> menggunakan Breising Konsentris Khusus Baja Eksternal.....	3-23
BAB 4	.....	4-1
4.1	Respons Elastis Struktur.....	4-1
4.1.1	Model Awal.....	4-1
4.1.2	Model Penurunan 1.....	4-5
4.1.3	Model Penurunan 2.....	4-9
4.1.4	Model Penurunan 3.....	4-14
4.1.5	Model Breising 1.....	4-18
4.1.6	Model Breising 2.....	4-22
4.1.7	Model Breising 3.....	4-26
4.2	Analisis Riwayat Waktu.....	4-30
4.2.1	Analisis Riwayat Waktu untuk Model 1 dengan <i>Retrofitting</i> .....	4-32
4.2.2	Analisis Riwayat Waktu untuk Model 2 dengan <i>Retrofitting</i> .....	4-36
4.2.3	Analisis Riwayat Waktu untuk Model 3 dengan <i>Retrofitting</i> .....	4-36
4.3	Respons Inelastis Struktur.....	4-42
4.3.1	Peralihan Lantai Maksimum.....	4-42
4.3.2	Rasio Simpangan Antar Lantai.....	4-46
4.3.3	Sendi Plastis.....	4-49
4.3.4	Gaya Geser Dasar .....	4-81
4.3.5	Faktor Pembesaran Defleksi.....	4-82
4.3.6	Tingkat Kinerja Struktur.....	4-83

BAB 5 .....	5-1
5.1 Kesimpulan.....	5-1
5.2 Saran.....	5-2
DAFTAR PUSTAKA .....	xxx
LAMPIRAN 1 .....	L1-1
LAMPIRAN 2.....	L2-1
LAMPIRAN 3.....	L3-1

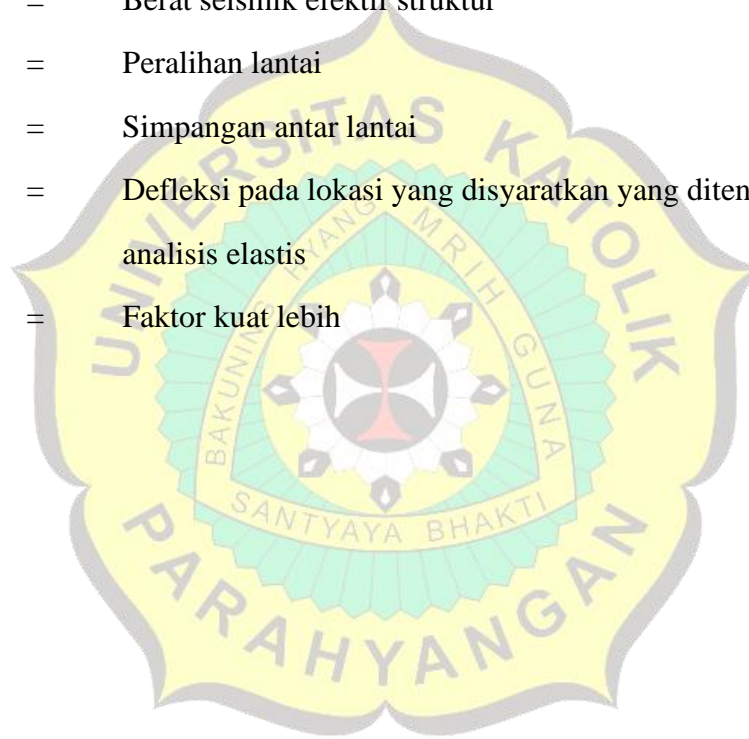


## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	=	Luas penampang
$A_g$	=	Luas penampang gross
ASCE	=	<i>American Society of Civil Engineers</i>
B	=	Panjang seluruhnya dari denah struktur pada arah yang ditinjau
$b_w$	=	Lebar badan penampang persegi
C	=	Koefisien gempa dasar
Cd	=	Faktor pebesaran defleksi
CP	=	<i>Collapse Prevention</i>
Ct	=	Parameter untuk menentukan periode fundamental struktur
d	=	Tinggi efektif komponen struktur
$d_i$	=	Simpangan horizontal pusat massa pada tingkat I akibat beban gempa horizontal (mm)
E	=	Modulus elastisitas
$e_c$	=	Eksentrisitas teoritis
$e_d$	=	Eksentrisitas rencana
$F_a$	=	Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek
$f_c'$	=	Kuat tekan beton
$F_{cre}$	=	Tegangan kritis tekuk baja
FEMA	=	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
$F_i$	=	Beban gempa horisontal dalam arah yang ditinjau yang bekerja pada tingkat i (kg)
$F_v$	=	Faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik

$f_y$	=	Kuat leleh tulangan baja
$F_y$	=	Tegangan leleh baja
HSS	=	<i>Hollow Square Section</i>
$g$	=	Percepatan gravitasi
$h$	=	Tinggi komponen struktur
$h_{sx}$	=	Tinggi tingkat di bawah tingkat x
$I_e$	=	Faktor keutamaan
IO	=	<i>Immediate Occupancy</i>
$I_x$	=	Momen inersia penampang terhadap sumbu x
$I_y$	=	Momen inersia penampang terhadap sumbu y
K	=	Faktor jenis struktur
$l_n$	=	Bentang bersih untuk komponen struktur
LS	=	<i>Life Safety</i>
m	=	Meter
$MCE_R$	=	<i>Risk Targeted Maximum Considered Earthquake</i>
mm	=	Milimeter
MPa	=	Mega Pascal
$P_{uc}$	=	Kapasitas tekan breis
$P_{ut}$	=	Kapasitas tarik breis
R	=	Faktor modifikasi respons
$r_x$	=	Radius girasi penampang terhadap sumbu x
$r_y$	=	Radius girasi penampang terhadap sumbu y
$R_y$	=	Rasio dari kuat leleh yang diinginkan terhadap kuat leleh minimum
SCBF	=	<i>Special Concentrically Braced Frames</i>
SNI	=	Standar Nasional Indonesia

SRBK	=	Sistem Rangka Breising Konsentris Khusus
T	=	Waktu getar alami struktur
T <sub>a</sub>	=	Periode fundamental pendekatan
WF	=	Wide Flange
W <sub>i</sub>	=	Bagian dari seluruh beban vertikal yang disumbangkan oleh beban-beban vertikal yang bekerja pada tingkat i (kg) pada peninjauan gempa
W <sub>t</sub>	=	Berat seismik efektif struktur
δ	=	Peralihan lantai
Δ	=	Simpangan antar lantai
δ <sub>xe</sub>	=	Defleksi pada lokasi yang disyaratkan yang ditentukan dengan analisis elastis
Ω <sub>0</sub>	=	Faktor kuat lebih



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1- 1 Denah Struktur Bangunan.....	1-4
Gambar 1- 2 Pemodelan 3D Struktur Bangunan .....	1-4
Gambar 1- 3 Denah Kasus Kebakaran Pada Seluruh Lantai 1.....	1-5
Gambar 1- 4 Denah Kasus Kebakaran Pada Setengah Gedung Bagian Kanan Lantai 3.....	1-5
Gambar 1- 5 Denah Kasus Kebakaran Pada Seluruh Lantai 5.....	1-5
Gambar 1- 6 Gambar 3D Breising Model 1.....	1-7
Gambar 1- 7 Gambar 3D Breising Model 2.....	1-7
Gambar 1- 8 Gambar 3D Breising Model 3.....	1-8
Gambar 2- 1 Parameter gerak tanah $S_s$ , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) wilayah Indonesia spektrum respons 0,2-detik (redaman kritis 5%) .....	2-7
Gambar 2- 2 Parameter gerak tanah $S_1$ , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) wilayah Indonesia spektrum respons 0,2-detik (redaman kritis 5%) .....	2-7
Gambar 2- 3 Spektrum Respons Desain .....	2-9
Gambar 2- 4 Penentuan simpangan antar tingkat .....	2-17
Gambar 2- 5 Ketidakbertauran Horizontal Tipe 1a dan 1b.....	2-20
Gambar 2- 6 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 2 .....	2-20
Gambar 2- 7 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 3 .....	2-21
Gambar 2- 8 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 4 .....	2-21
Gambar 2- 9 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 5 .....	2-22
Gambar 2- 10 Ketidakberaturan vertikal Tipe 1a dan 1b.....	2-22
Gambar 2- 11 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 .....	2-23
Gambar 2- 12 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 3 .....	2-23
Gambar 2- 13 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 4 .....	2-24
Gambar 2- 14 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5a dan 5b.....	2-25
Gambar 2- 15 Contoh bagian dari pelat yang diikutkan dengan balok untuk desain torsi .....	2-27
Gambar 2- 16 Pengaruh temperatur terhadap konduktivitas termal .....	2-36
Gambar 2- 17 Penurunan massa jenis akibat temperatur .....	2-36
Gambar 2- 18 Kekuatan tekan beton beragregat silika pada temperatur dan setelah terjadi pendinginan.....	2-37
Gambar 2- 19 Modulus elastisitas beton akibat temperatur.....	2-37
Gambar 2- 20 Hubungan temperature dan waktu yang digunakan untung uji elemen bangunan.....	2-38



Gambar 2- 21 Estimasi penurunan kekuatan tekan beton beragregat silika karena temperatur.....	2-39
Gambar 2- 22 Estimasi penurunan modulus elastisitas beton beragregat silika karena temperatur.....	2-39
Gambar 2- 23 Rekaman Gempa El Centro N-S tahun 1940 .....	2-43
Gambar 2- 24 Rekaman Gempa Parkfield N65E.....	2-43
Gambar 2- 25 Rekaman Gempa Bucharest N-S 1977 .....	2-44
Gambar 2- 26 Rekaman Gempa Denpasar B-T 1979 .....	2-44
Gambar 2- 27 Rekaman Gempa Flores 1992.....	2-44
Gambar 2- 28 Ilustrasi Redaman Rayleigh .....	2-49
Gambar 2- 29 Jenis Konfigurasi Breising Konsentris.....	2-50
Gambar 2- 30 Rasio Lebar terhadap Tebal Elemen Tekan .....	2-52
Gambar 2- 31 Retrofitting Lokal dengan NSM .....	2-53
Gambar 3- 1 Grafik Respon Spektrum Kota Bandung .....	3-4
Gambar 3- 2 Balok dan Kolom Elevasi B dan Elevasi 10.....	3-8
Gambar 3- 3 Balok dan Kolom Elevasi J dan Elevasi 2 .....	3-9
Gambar 3- 4 Balok dan Kolom Elevasi D, H, 8 dan 4.....	3-9
Gambar 3- 5 Balok dan Kolom Elevasi F dan Elevasi 6.....	3-10
Gambar 3- 6 Balok Anak. ....	3-10
Gambar 3- 7 Denah Elemen Struktur Model 1 yang mengalami penurunan.....	3-12
Gambar 3- 8 Elevasi Elemen Struktur Model 1 yang mengalami penurunan.....	3-12
Gambar 3- 9 Denah Elemen Struktur Model 2 yang mengalami penurunan.....	3-16
Gambar 3- 10 Elevasi Elemen Struktur Model 2 yang mengalami penurunan.....	3-16
Gambar 3- 11 Denah Elemen Struktur Model 3 yang mengalami penurunan.....	3-20
Gambar 3- 12 Elevasi Elemen Struktur Model 3 yang mengalami penurunan.....	3-20
Gambar 3- 13 Gambar 3D Model Breising 1 .....	3-24
Gambar 3- 14 Denah Model Breising 1 .....	3-25
Gambar 3- 15 Tampak samping Model Breising 1 .....	3-25
Gambar 3- 16 Gambar 3D Model Breising 2.....	3-29
Gambar 3- 17 Denah Model Breising 2 .....	3-29
Gambar 3- 18 Tampak samping Model Breising 2.....	3-30
Gambar 3- 19 Gambar 3D Model Breising 3.....	3-33
Gambar 3- 20 Denah Model Breising 3 .....	3-34
Gambar 3- 21 Tampak Samping Model Breising 3 .....	3-34
Gambar 4- 1 Simpangan antar Lantai Arah X dan Arah Y Model Awal.....	4-3
Gambar 4- 2 Simpangan antar Lantai Arah X dan Arah Y Model Penurunan 1 ....	4-7
Gambar 4- 3 Simpangan antar Lantai Arah X dan Arah Y Model Penurunan 2 ..	4-11
Gambar 4- 4 Simpangan antar Lantai Arah X dan Arah Y Model Penurunan 3 ..	4-15
Gambar 4- 5 Simpangan antar Lantai Arah X dan Arah Y Model Breising 1 .....	4-19

Gambar 4- 6 Simpangan antar Lantai Arah X dan Arah Y Model Breising 2.....	4-23
Gambar 4- 7 Simpangan antar Lantai Arah X dan Arah Y Model Breising 3.....	4-27
Gambar 4- 8 Percepatan Tanah Dasar Akibat Gempa utama El Centro .....	4-31
Gambar 4- 9 Percepatan Tanah Dasar Akibat Gempa utama Bucharest .....	4-31
Gambar 4- 10 Percepatan Tanah Dasar Akibat Gempa utama Parkfield.....	4-31
Gambar 4- 11 Percepatan Tanah Dasar Akibat Gempa utama Denpasar .....	4-31
Gambar 4- 12 Percepatan Tanah Dasar Akibat Gempa utama Flores .....	4-32
Gambar 4- 13 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 1 yang Di-retrofit Tampak 3D (El Centro).....	4-33
Gambar 4- 14 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 1 yang Di-retrofit Elevasi D (El Centro) .....	4-33
Gambar 4- 15 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 1 yang Di-retrofit Elevasi 1 (El Centro).....	4-34
Gambar 4- 16 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 1 yang Di-retrofit Elevasi 11 (El Centro).....	4-34
Gambar 4- 17 Retrofitting Lokal pada Gedung Model 1 Elevasi D .....	4-35
Gambar 4- 18 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Tampak 3D (El Centro).....	4-37
Gambar 4- 19 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Elevasi B (El Centro) .....	4-37
Gambar 4- 20 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Elevasi D (El Centro) .....	4-38
Gambar 4- 21 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Elevasi J (El Centro) .....	4-38
Gambar 4- 22 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Elevasi 1 (El Centro).....	4-39
Gambar 4- 23 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Elevasi 11 (El Centro).....	4-39
Gambar 4- 24 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Elevasi 4 (El Centro).....	4-40
Gambar 4- 25 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Elevasi 6 (El Centro).....	4-40
Gambar 4- 26 Letak Sendi Plastis pada Gedung Model 3 yang Di-retrofit Elevasi 8 (El Centro).....	4-41
Gambar 4- 27 Retrofitting Lokal pada Gedung Model 3 Elevasi D .....	4-42
Gambar 4- 28 Peralihan Lantai Maksimum Model 1.....	4-43
Gambar 4- 29 Peralihan Lantai Maksimum Model 2 Arah X.....	4-44
Gambar 4- 30 Peralihan Lantai Maksimum Model 2 Arah Y.....	4-45
Gambar 4- 31 Peralihan Lantai Maksimum Model 3.....	4-46

Gambar 4- 32 Rasio Simpangan Antar Lantai Model 1.....	4-47
Gambar 4- 33 Rasio Simpangan Antar Lantai Model 2 Arah X.....	4-48
Gambar 4- 34 Rasio Simpangan Antar Lantai Model 2 Arah Y.....	4-48
Gambar 4- 35 Rasio Simpangan Antar Lantai Model 3.....	4-49
Gambar 4- 36 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat El Centro saat detik 2,0.....	4-50
Gambar 4- 37 Sendi Plastis Model 1 Elevasi D akibat El Centro saat detik 14,0	4-50
Gambar 4- 38 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat El Centro saat detik 14,0.....	4-51
Gambar 4- 39 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat Parkfield saat detik 3,7.....	4-51
Gambar 4- 40 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat Parkfield saat detik 21,0.....	4-52
Gambar 4- 41 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat Bucharest saat detik 3,0.....	4-52
Gambar 4- 42 Sendi Plastis Model 1 Elevasi D akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-53
Gambar 4- 43 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-53
Gambar 4- 44 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar saat detik 4,1.....	4-54
Gambar 4- 45 Sendi Plastis Model 1 Elevasi D akibat Denpasar saat detik 30,04	4-54
Gambar 4- 46 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar saat detik 30,0.....	4-55
Gambar 4- 47 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat Flores saat detik 22,8.....	4-55
Gambar 4- 48 Sendi Plastis Model 1 Elevasi 1 dan 11 akibat Flores saat detik 40,0.....	4-56
Gambar 4- 49 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat El Centro saat detik 2,2.....	4-56
Gambar 4- 50 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat El Centro saat detik 14,0.....	4-57
Gambar 4- 51 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat Flores saat detik 3,8.....	4-57
Gambar 4- 52 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat Flores saat detik 21,0.....	4-58
Gambar 4- 53 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat Bucharest saat detik 3,0.....	4-58

Gambar 4- 54 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-59
Gambar 4- 55 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar saat detik 4,3.....	4-59
Gambar 4- 56 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar saat detik 30,0.....	4-60
Gambar 4- 57 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat Flores saat detik 35,3.....	4-60
Gambar 4- 58 Sendi Plastis Model 2 Arah X Elevasi 1 dan 11 akibat Flores saat detik 40,0.....	4-61
Gambar 4- 59 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A dan K akibat El Centro saat detik 2,2.....	4-61
Gambar 4- 60 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi B akibat El Centro saat detik 2,2.....	4-62
Gambar 4- 61 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A dan K akibat El Centro saat detik 14,0.....	4-62
Gambar 4- 62 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi B akibat El Centro saat detik 14,0.....	4-63
Gambar 4- 63 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A akibat Parkfield saat detik 3,8.....	4-63
Gambar 4- 64 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi K akibat Parkfield saat detik 3,8.....	4-64
Gambar 4- 65 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A akibat Parkfield saat detik 21,0.....	4-64
Gambar 4- 66 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi K akibat Parkfield saat detik 21,0.....	4-65
Gambar 4- 67 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A akibat Bucharest saat detik 3,0.....	4-65
Gambar 4- 68 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi K akibat Buchrest saat detik 3,0.....	4-66
Gambar 4- 69 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi J akibat Bucharest saat detik 3,0.....	4-66
Gambar 4- 70 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-67
Gambar 4- 71 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi K akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-67
Gambar 4- 72 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi B akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-68

Gambar 4- 73 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi J akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-68
Gambar 4- 74 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi K akibat Denpasar saat detik 4,3.....	4-69
Gambar 4- 75 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A dan K akibat Denpasar saat detik 30,0.....	4-69
Gambar 4- 76 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi J akibat Denpasar saat detik 30,0.....	4-70
Gambar 4- 77 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A dan K akibat Flores saat detik 35,4.....	4-70
Gambar 4- 78 Sendi Plastis Model 2 Arah Y Elevasi A dan K akibat Flores saat detik 40,0.....	4-71
Gambar 4- 79 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat El Centro saat detik 2,2.....	4-71
Gambar 4- 80 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 4 dan 8 akibat El Centro saat detik 2,2.....	4-72
Gambar 4- 81 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 6 akibat El Centro saat detik 2,2 ...	4-72
Gambar 4- 82 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat El Centro saat detik 14,0.....	4-73
Gambar 4- 83 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 2 dan 10 akibat El Centro saat detik 14,0.....	4-73
Gambar 4- 84 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 4 dan 8 akibat El Centro saat detik 14,0.....	4-74
Gambar 4- 85 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 6 akibat El Centro saat detik 14,0	4-74
Gambar 4- 86 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat Parkfield saat detik 3,7.....	4-75
Gambar 4- 87 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat Parkfield saat detik 21,0.....	4-75
Gambar 4- 88 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat Bucharest saat detik 3,0.....	4-76
Gambar 4- 89 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-76
Gambar 4- 90 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 2 dan 10 akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-77
Gambar 4- 91 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 4 dan 8 akibat Bucharest saat detik 16,3.....	4-77
Gambar 4- 92 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 6 akibat Bucharest saat detik 16,3.	4-78
Gambar 4- 93 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar saat detik 4,3.....	4-78

Gambar 4- 94 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar saat detik 30,0.....	4-79
Gambar 4- 95 Sendi Plastis Model 3 Elevasi H akibat Denpasar saat detik 30,0.....	4-79
Gambar 4- 96 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat Flores saat detik 35,3.....	4-80
Gambar 4- 97 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 1 dan 11 akibat Flores saat detik 40,0.....	4-80
Gambar 4- 98 Sendi Plastis Model 3 Elevasi 6 akibat Flores saat detik 40,0.....	4-81
Gambar 4- 99 D/C ratio Struktur Model 1 elevasi 1 dan 11 akibat El Centro (LS) .....	4-84
Gambar 4- 100 D/C ratio Struktur Model 1 elevasi D akibat El Centro (LS) .....	4-84
Gambar 4- 101 D/C ratio Struktur Model 1 elevasi 1 dan 11 akibat Parkfield (LS) .....	4-85
Gambar 4- 102 D/C ratio Struktur Model 1 elevasi 1 dan 11 akibat Bucharest (LS) .....	4-85
Gambar 4- 103 D/C ratio Struktur Model 1 elevasi D akibat Bucharest (LS).....	4-86
Gambar 4- 104 D/C ratio Struktur Model 1 elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar (LS) .....	4-86
Gambar 4- 105 D/C ratio Struktur Model 1 elevasi H akibat Denpasar (LS).....	4-87
Gambar 4- 106 D/C ratio Struktur Model 1 elevasi 1 dan 11 akibat Flores (LS).....	4-87
Gambar 4- 107 D/C ratio Struktur Model 2 arah X elevasi 1 akibat El Centro (LS) .....	4-88
Gambar 4- 108 D/C ratio Struktur Model 2 arah X elevasi 11 akibat El Centro (LS) .....	4-89
Gambar 4- 109 D/C ratio Struktur Model 2 arah X elevasi 1 akibat Parkfield (LS) .....	4-89
Gambar 4- 110 D/C ratio Struktur Model 2 arah X elevasi 11 akibat Parkfield (LS) .....	4-90
Gambar 4- 111 D/C ratio Struktur Model 2 arah X elevasi 1 akibat Bucharest (IO).....	4-90
Gambar 4- 112 D/C ratio Struktur Model 2 arah X elevasi 11 akibat Bucharest (IO).....	4-91
Gambar 4- 113 D/C ratio Struktur Model 2 arah X elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar (IO).....	4-91
Gambar 4- 114 D/C ratio Struktur Model 2 arah X elevasi 1 dan 11 akibat Flores (IO).....	4-92
Gambar 4- 115 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi A akibat El Centro (IO).....	4-93

Gambar 4- 116 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi K akibat El Centro (IO).....	4-93
Gambar 4- 117 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi A akibat Parkfield (IO).....	4-94
Gambar 4- 118 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi K akibat Parkfield (IO).....	4-94
Gambar 4- 119 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi A akibat Bucharest (LS) .....	4-95
Gambar 4- 120 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi K akibat Bucharest (LS) .....	4-95
Gambar 4- 121 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi A akibat Denpasar (IO).....	4-96
Gambar 4- 122 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi K akibat Denpasar (IO).....	4-96
Gambar 4- 123 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi J akibat Denpasar (IO).....	4-97
Gambar 4- 124 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi A akibat Flores (IO).....	4-97
Gambar 4- 125 D/C ratio Struktur Model 2 arah Y elevasi K akibat Flores (IO).....	4-98
Gambar 4- 126 127 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 1 dan 11 akibat El Centro (LS) .....	4-99
Gambar 4- 128 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 2 dan 10 akibat El Centro (LS) .....	4-99
Gambar 4- 129 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 4 dan 8 akibat El Centro (LS) .....	4-100
Gambar 4- 130 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 6 akibat El Centro (LS) .....	4-100
Gambar 4- 131 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 1 dan 11 akibat Parkfield (IO).....	4-101
Gambar 4- 132 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 1 dan 11 akibat Bucharest (LS) .....	4-101
Gambar 4- 133 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 2 dan 10 akibat Bucharest (LS) .....	4-102
Gambar 4- 134 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 4 dan 8 akibat Bucharest (LS) .....	4-102
Gambar 4- 135 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 6 akibat Bucharest (LS).....	4-103
Gambar 4- 136 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 1 dan 11 akibat Denpasar (IO).....	4-103
Gambar 4- 137 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi B akibat Denpasar (IO) .....	4-104
Gambar 4- 138 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi H akibat Denpasar (IO) .....	4-104
Gambar 4- 139 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 1 dan 11 akibat Flores (LS).....	4-105

Gambar 4- 140 D/C ratio Struktur Model 3 elevasi 6 akibat Flores (LS).....4-105





## DAFTAR TABEL

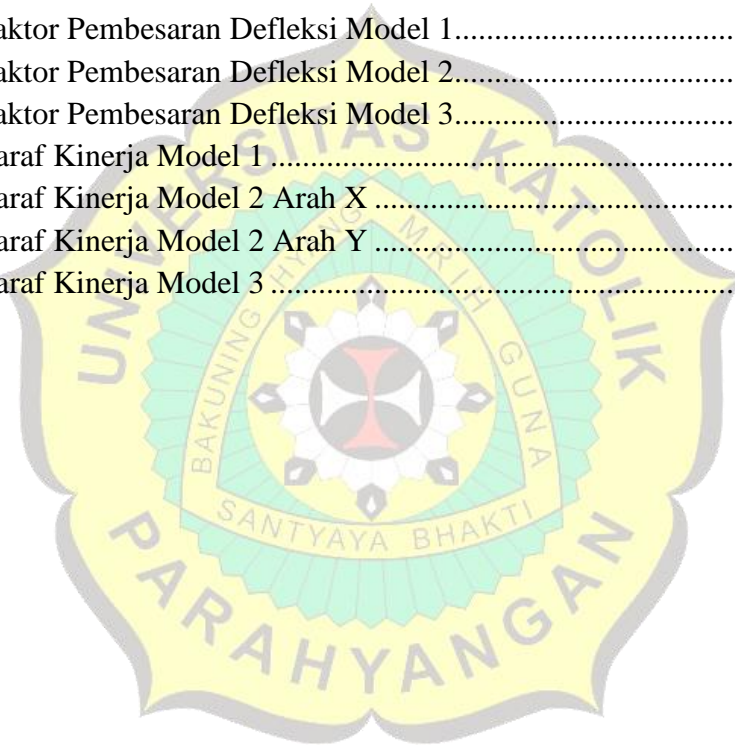
Tabel 2- 1 Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung untuk beban gempa .....	2-2
Tabel 2- 2 Faktor keutamaan gempa .....	2-2
Tabel 2- 3 Klasifikasi situs.....	2-4
Tabel 2- 4 Koefisien situs, $F_a$ .....	2-6
Tabel 2- 5 Koefisien situs, $F_v$ .....	2-6
Tabel 2- 6 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek.....	2-10
Tabel 2- 7 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik .....	2-10
Tabel 2- 8 Faktor $R$ , $C_d$ , dan $\Omega_0$ untuk sistem pemikul gaya seismik .....	2-11
Tabel 2- 9 Persyaratan untuk masing-masing tingkat yang menahan lebih dari 35% gaya geser dasar .....	2-12
Tabel 2- 10 Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung.....	2-14
Tabel 2- 11 Nilai parameter periode pendekatan $C_t$ dan $x$ .....	2-15
Tabel 2- 12 Simpangan antar tingkat izin, $\Delta_a^{a,b}$ .....	2-18
Tabel 2- 13 Ketebalan minimum pelat dua arah nonprategang dengan balok di antara tumpuan pada semua sisi.....	2-26
Tabel 2- 14 Tinggi minimum balok nonprategang .....	2-26
Tabel 2- 15 Ketebalan selimut beton untuk komponen struktur beton nonprategang yang dicor di tempat .....	2-28
Tabel 2- 16 Tabel Kontrol Kerusakan dan Tingkat Kinerja Struktur .....	2-32
Tabel 2- 17 Tingkat Kinerja Struktur dan Kerusakan pada elemen vertikal.....	2-33
Tabel 2- 18 Karakteristik baja tulangan sebelum dan setelah terpapar api.....	2-40
Tabel 3- 1 Beban mati tambahan pada lantai 1-5.....	3-3
Tabel 3- 2 Beban mati tambahan pada lantai 6 (atap).....	3-3
Tabel 3- 3 Kombinasi Pembebanan .....	3-5
Tabel 3- 4 Dimensi Elemen Struktur .....	3-6
Tabel 3- 5 Penulangan Kolom pada pemodelan awal.....	3-6
Tabel 3- 6 Penulangan Balok L pada pemodelan awal .....	3-7
Tabel 3- 7 Penulangan Balok T pada pemodelan awal .....	3-7
Tabel 3- 8 Penulangan Balok Anak pada pemodelan awal.....	3-8
Tabel 3- 9 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi B, J, 10, dan 12.....	3-13
Tabel 3- 10 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi B, J, 10, dan 12.....	3-13

Tabel 3- 11 Perbandingan As perlu dan As pasang balok pada Elevasi D, H, 8, 4.....	3-13
Tabel 3- 12 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi D, H, 8, 4.....	3-14
Tabel 3- 13 Perbandingan As perlu dan As pasang balok pada Elevasi F dan 6..	3-14
Tabel 3- 14 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi F dan 6..	3-14
Tabel 3- 15 Perbandingan As perlu dan As pasang balok anak.....	3-15
Tabel 3- 16 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi B, J, 10, dan 12.....	3-17
Tabel 3- 17 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom Elevasi B, J, 10, dan 12.....	3-17
Tabel 3- 18 Perbandingan As perlu dan As pasang balok pada Elevasi D, H, 8, 4.....	3-17
Tabel 3- 19 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi D, H, 8, 4.....	3-18
Tabel 3- 20 Perbandingan As perlu dan As pasang balok pada Elevasi F dan 6..	3-18
Tabel 3- 21 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi F dan 6..	3-18
Tabel 3- 22 Perbandingan As perlu dan As pasang balok anak.....	3-19
Tabel 3- 23 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi B, J, 10, dan 12.....	3-21
Tabel 3- 24 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom Elevasi B, J, 10, dan 12.....	3-21
Tabel 3- 25 Perbandingan As perlu dan As pasang balok pada Elevasi D, H, 8, 4.....	3-21
Tabel 3- 26 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi D, H, 8, 4.....	3-22
Tabel 3- 27 Perbandingan As perlu dan As pasang balok pada Elevasi F dan 6..	3-22
Tabel 3- 28 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi F dan 6..	3-22
Tabel 3- 29 Perbandingan As perlu dan As pasang balok anak.....	3-23
Tabel 3- 30 Profil Baja pada Model Breising 1 .....	3-24
Tabel 3- 31 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi B, J, 10, dan 12 Pada Model Bracing 1 .....	3-26
Tabel 3- 32 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi B, J, 10, dan 12 Pada Model Bracing 1 .....	3-26
Tabel 3- 33 Perbandingan As perlu dan As pasang balok pada Elevasi D, H, 8, 4 Pada Model Bracing 1 .....	3-26
Tabel 3- 34 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi D, H, 8, 4 Pada Model Bracing 1 .....	3-27

Tabel 3- 35 Perbandingan As perlu dan As pasang balok pada Elevasi F dan 6 Pada Model Bracing 1 .....	3-27
Tabel 3- 36 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom pada Elevasi F dan 6 Pada Model Bracing 1 .....	3-27
Tabel 3- 37 Perbandingan As perlu dan As pasang balok anak Pada Model Bracing 1 .....	3-28
Tabel 3- 38 Profil Baja pada Model Breising 2 .....	3-28
Tabel 3- 39 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi B, J, 10, dan 12 Pada Model Bracing 2.....	3-30
Tabel 3- 40 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom Elevasi B, J, 10, dan 12 Pada Model Bracing 2.....	3-31
Tabel 3- 41 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi D, H, 8, 4 Pada Model Bracing 2.....	3-31
Tabel 3- 42 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom Elevasi D, H, 8, 4 Pada Model Bracing 2.....	3-31
Tabel 3- 43 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi F dan 6 Pada Model Bracing 2.....	3-32
Tabel 3- 44 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi F dan 6 Pada Model Bracing 2.....	3-32
Tabel 3- 45 Perbandingan As perlu dan As pasang balok anak Pada Model Bracing 2.....	3-32
Tabel 3- 46 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi B, J, 10, dan 12 Pada Model Bracing 3.....	3-35
Tabel 3- 47 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom Elevasi B, J, 10, dan 12 Pada Model Bracing 3.....	3-35
Tabel 3- 48 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi D, H, 8, 4 Pada Model Bracing 3.....	3-35
Tabel 3- 49 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom Elevasi D, H, 8, 4 Pada Model Bracing 3.....	3-36
Tabel 3- 50 Perbandingan As perlu dan As pasang balok Elevasi F dan 6 Pada Model Bracing 3.....	3-36
Tabel 3- 51 Perbandingan As perlu dan As pasang kolom Elevasi F dan 6 Pada Model Bracing 3.....	3-36
Tabel 3- 52 Perbandingan As perlu dan As pasang balok anak Pada Model Bracing 3.....	3-37
Tabel 4- 1 Periode dan Ragam Getar Model Awal.....	4-1
Tabel 4- 2 Simpangan antar lantai Model Awal .....	4-2
Tabel 4- 3 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1A dan 1B Model Awal.....	4-3
Tabel 4- 4 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1A dan 1B Model Awal.....	4-4

Tabel 4- 5 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 Model Awal.....	4-4
Tabel 4- 6 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5A dan 5B Model Awal.....	4-5
Tabel 4- 7 Periode dan Ragam Getar Model Penurunan 1.....	4-5
Tabel 4- 8 Simpangan antar rantai Model Penurunan 1.....	4-6
Tabel 4- 9 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1A dan 1B Model Penurunan 1.....	4-7
Tabel 4- 10 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1A dan 1B Model Penurunan 1.....	4-8
Tabel 4- 11 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 Model Penurunan 1.....	4-8
Tabel 4- 12 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5A dan 5B Model Penurunan 1.....	4-9
Tabel 4- 13 Periode dan Ragam Getar Model Penurunan 2.....	4-9
Tabel 4- 14 Simpangan antar rantai Model Penurunan 2.....	4-10
Tabel 4- 15 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1A dan 1B Model Penurunan 2.....	4-11
Tabel 4- 16 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1A dan 1B Model Penurunan 2.....	4-12
Tabel 4- 17 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 Model Penurunan 2.....	4-13
Tabel 4- 18 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5A dan 5B Model Penurunan 2.....	4-13
Tabel 4- 19 Periode dan Ragam Getar Model Penurunan 3.....	4-14
Tabel 4- 20 Simpangan antar rantai Model Penurunan 3.....	4-15
Tabel 4- 21 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1A dan 1B Model Penurunan 3.....	4-16
Tabel 4- 22 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1A dan 1B Model Penurunan 3.....	4-17
Tabel 4- 23 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 Model Penurunan 3.....	4-17
Tabel 4- 24 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5A dan 5B Model Penurunan 3.....	4-17
Tabel 4- 25 Periode dan Ragam Getar Model Breising 1.....	4-18
Tabel 4- 26 Simpangan antar rantai Model Breising 1.....	4-19
Tabel 4- 27 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1A dan 1B Model Breising 1.....	4-20
Tabel 4- 28 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1A dan 1B Model Breising 1.....	4-21
Tabel 4- 29 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 Model Breising 1.....	4-21
Tabel 4- 30 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5A dan 5B Model Breising 1.....	4-21
Tabel 4- 31 Periode dan Ragam Getar Model Breising 2.....	4-22
Tabel 4- 32 Simpangan antar rantai Model Breising 2.....	4-23
Tabel 4- 33 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1A dan 1B Model Breising 2.....	4-24
Tabel 4- 34 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1A dan 1B Model Breising 2.....	4-25
Tabel 4- 35 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 Model Breising 2.....	4-25
Tabel 4- 36 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5A dan 5B Model Breising 2.....	4-25
Tabel 4- 37 Periode dan Ragam Getar Model Breising 3.....	4-26
Tabel 4- 38 Simpangan antar rantai Model Breising 3.....	4-27
Tabel 4- 39 Ketidakberaturan Horizontal Tipe 1A dan 1B Model Breising 3.....	4-28
Tabel 4- 40 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1A dan 1B Model Breising 3.....	4-29
Tabel 4- 41 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 2 Model Breising 3.....	4-29
Tabel 4- 42 Ketidakberaturan Vertikal Tipe 5A dan 5B Model Breising 3.....	4-29
Tabel 4- 43 Peralihan Rantai Maksimum Model 1.....	4-43

Tabel 4- 44 Peralihan Lantai Maksimum Model 2 .....	4-44
Tabel 4- 45 Peralihan Lantai Maksimum Model 3 .....	4-45
Tabel 4- 46 Rasio Simpangan Antar Lantai Model 1 .....	4-46
Tabel 4- 47 Rasio Simpangan Antar Lantai Model 2 .....	4-47
Tabel 4- 48 Rasio Simpangan Antar Lantai Model 3 .....	4-49
Tabel 4- 49 Perbandingan Gaya Geser Dasar Analisis Modal dan Analisis Riwayat Waktu Model 1 .....	4-81
Tabel 4- 50 Perbandingan Gaya Geser Dasar Analisis Modal dan Analisis Riwayat Waktu Model 2 .....	4-82
Tabel 4- 51 Perbandingan Gaya Geser Dasar Analisis Modal dan Analisis Riwayat Waktu Model 3 .....	4-82
Tabel 4- 52 Faktor Pembesaran Defleksi Model 1.....	4-82
Tabel 4- 53 Faktor Pembesaran Defleksi Model 2.....	4-83
Tabel 4- 54 Faktor Pembesaran Defleksi Model 3.....	4-83
Tabel 4- 55 Taraf Kinerja Model 1 .....	4-87
Tabel 4- 56 Taraf Kinerja Model 2 Arah X .....	4-92
Tabel 4- 57 Taraf Kinerja Model 2 Arah Y .....	4-98
Tabel 4- 58 Taraf Kinerja Model 3 .....	4-106



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Meningkatnya pertumbuhan penduduk di Indonesia saat ini memberikan dampak tingginya tingkat kebutuhan ruang untuk sarana dan prasarana agar dapat menunjang aktivitas kehidupan masyarakat di Indonesia. Seiring dengan banyaknya fasilitas ruang yang diperlukan, ketersediaan lahan juga semakin terbatas. Sehingga salah satu solusi untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan membangun gedung bertingkat. Pembangunan gedung bertingkat dengan material beton sudah dikenal sejak lama dan merupakan material yang paling sering digunakan. Hal tersebut disebabkan karena beton lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan material lain.

Akhir-akhir ini, banyak terjadi kasus kebakaran bangunan gedung di Indonesia. Kebakaran gedung dapat disebabkan oleh berbagai hal seperti arus listrik yang pendek, tindak kriminalitas, meledaknya tabung gas, dan lain-lain. Pada umumnya material beton sendiri merupakan material yang memiliki tingkat ketahanan yang lebih baik terhadap api jika dibandingkan dengan struktur kayu dan struktur baja. Hal ini disebabkan karena beton memiliki daya hantar panas yang rendah. Ketebalan selimut beton dirancang agar dapat menghalangi rembetan panas ke bagian dalam struktur beton sehingga tulangan baja tidak mengalami penurunan kekuatan yang drastis. Selain itu keruntuhan pada material beton akibat kebakaran terjadi secara bertahap.

Umumnya kasus kebakaran pada gedung dapat mencapai suhu 400°C hingga 1000°C. Hal tersebut dapat menyebabkan material beton mengalami perubahan pada sifat dan kekuatan struktur. Kekuatan struktur bangunan gedung pasca kebakaran ditentukan oleh durasi saat struktur terpapar oleh api. Semakin lama beton terbakar maka tingkat kekuatan dan kapasitas struktur beton semakin berkurang sehingga struktur tidak dapat bekerja secara maksimal. Pada saat api

mencapai 200°, kekuatan struktur belum terpengaruh. Selanjutnya pada rentang suhu 200°C hingga 600°C, air dalam pori mulai menguap sehingga pori-pori kosong dan kekuatan tekan beton akan menurun. Penguapan air dapat mengakibatkan tekanan uap pada pori juga meningkat sehingga jika uap air terhambat keluar, beton akan mengalami *explosive spalling* atau sebagian segmen beton terlepas. Pada suhu 700°C - 900°C akan terjadi kalsinasi yang dapat mengakibatkan crack pada beton sehingga kuat tekannya menurun. Sedangkan pada baja tulangan, kekuatannya dapat diatasi dengan memberikan ketebalan yang cukup pada selimut beton sehingga terjadinya tekuk dan penurunan kekuatan dapat diatasi.

Gedung beton pasca kebakaran tidak selamanya harus langsung dihancurkan atau dibongkar, karena elemen struktur bangunan yang mengalami kebakaran masih memiliki kekuatan sisa. Elemen struktur yang mengalami penurunan kekuatan pasca kebakaran adalah balok, kolom, dan pelat. Penurunan kekuatan elemen struktur tersebut dapat membuat struktur tidak kuat untuk menopang beban gempa dan beban gravitasi sehingga balok, kolom, dan pelat perlu perkuatan agar dapat meningkatkan kekuatan struktur sehingga dapat memikul beban seperti semula. Perkuatan struktur atau *Retrofitting* memiliki fungsi untuk meningkatkan kekuatan lateral struktur dan daktilitas struktur. Terdapat dua macam perkuatan yaitu perkuatan secara global dan lokal. Perkuatan global adalah perkuatan yang diberikan pada keseluruhan bangunan untuk memenuhi persyaratan struktural. Contoh perkuatan global adalah pemberian breising baja, dinding geser, dan *base isolation*. Sedangkan perkuatan lokal adalah perkuatan yang diberikan pada elemen struktur seperti balok dan kolom yang tidak dapat lagi menahan beban yang bekerja. Contoh dari perkuatan lokal adalah dengan penambahan tulangan pada kolom atau balok untuk memperbaiki kekuatannya dan pembungkusan dengan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) untuk memperbaiki daktilitasnya.

## 1.2 Inti Permasalahan

Setelah terjadi kebakaran pada bangunan gedung bertingkat, struktur akan mengalami penurunan kekuatan sehingga tidak mampu menahan beban gravitasi dan beban gempa yang bekerja seperti semula. Agar struktur dapat difungsikan kembali, maka dapat dilakukan perkuatan struktur atau *Retrofitting* tanpa membongkar bangunan gedung. Pada studi kasus ini, akan dilakukan perkuatan struktur menggunakan breising baja konsentris khusus sesuai dengan kebutuhan yaitu dimana letak dan tinggi lantai kebakaran terjadi pada gedung.

## 1.3 Tujuan Penulisan

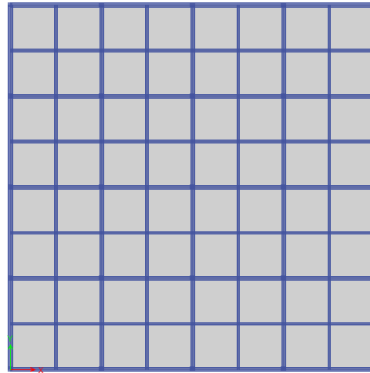
Tujuan penulisan skripsi ini adalah untuk menganalisis kekuatan struktur gedung yang mengalami penurunan kekuatan akibat kebakaran. Kemudian ditingkatkan kembali kekuatan, kekakuan dan daktilitas struktur gedung tersebut dengan *retrofitting* menggunakan breising baja konsentris khusus sesuai dengan letak dan tinggi lantai yang mengalami kebakaran. Untuk mengecek kinerja gedung setelah diberikan *retrofitting*, akan dilakukan analisis riwayat waktu.

## 1.4 Pembatasan Masalah

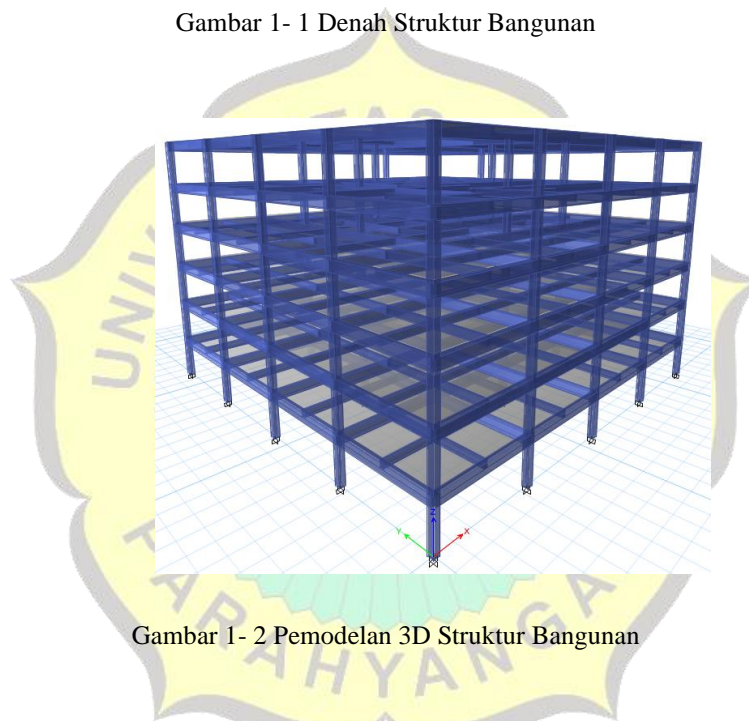
Pembatasan masalah pada skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Lokasi bangunan berada di Bandung dengan kelas situs tanah sedang (SD)
2. Bangunan memiliki fungsi sebagai apartemen yang memiliki denah berbentuk persegi. Terdiri dari 6 lantai dengan ketinggian antar lantai sebesar 3.5 meter. Bentang pada arah x dan arah y simetris sebanyak 4 bentang dengan panjang 8 meter.





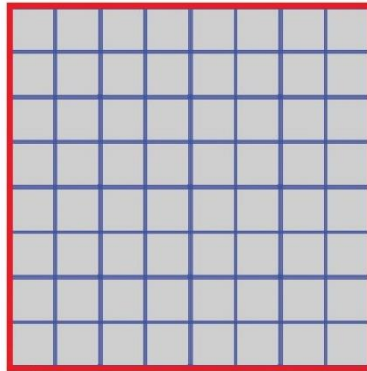
Gambar 1- 1 Denah Struktur Bangunan



Gambar 1- 2 Pemodelan 3D Struktur Bangunan

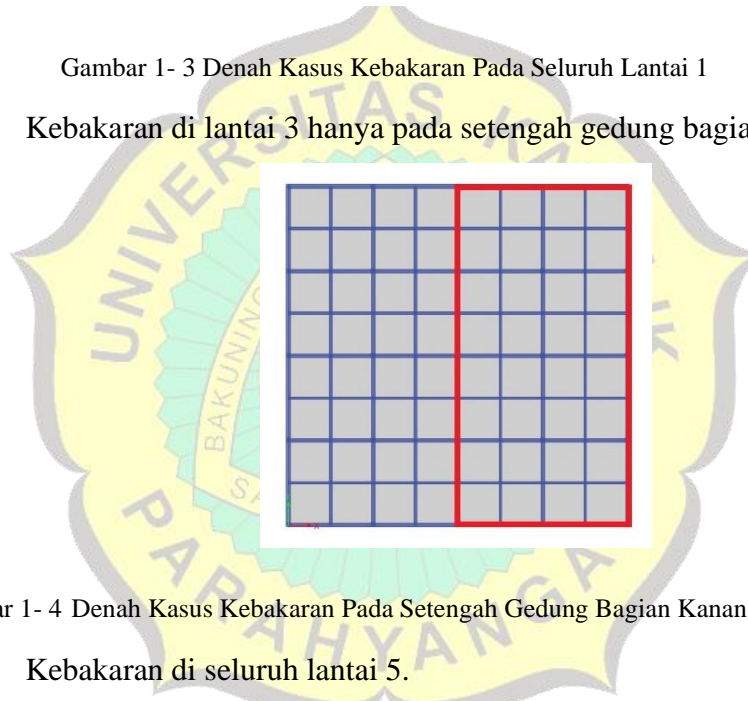
3. Software yang digunakan adalah ETABS 2016.
4. Kebakaran mencapai suhu  $800^{\circ}\text{C}$  dengan durasi 45 menit. Wilayah yang mengalami kebakaran dimodelkan menjadi 3 macam yaitu:

- a. Kebakaran di seluruh lantai 1.



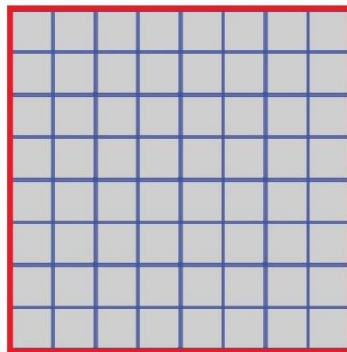
Gambar 1- 3 Denah Kasus Kebakaran Pada Seluruh Lantai 1

- b. Kebakaran di lantai 3 hanya pada setengah gedung bagian kanan.



Gambar 1- 4 Denah Kasus Kebakaran Pada Setengah Gedung Bagian Kanan Lantai 3

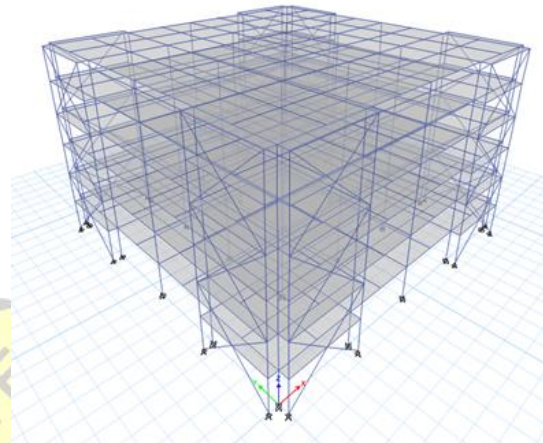
- c. Kebakaran di seluruh lantai 5.



Gambar 1- 5 Denah Kasus Kebakaran Pada Seluruh Lantai 5

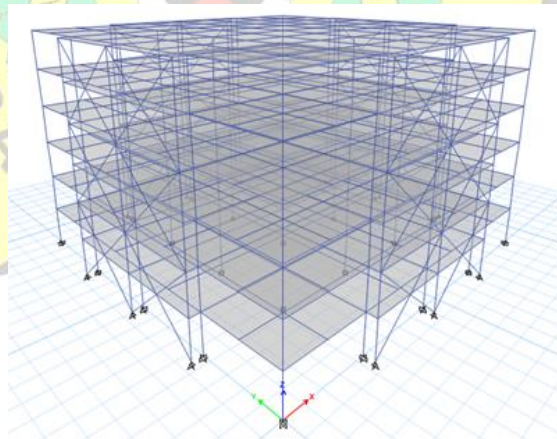
5. Spesifikasi beton bertulang yang digunakan untuk desain struktur adalah:
  - a. Berat jenis beton =  $24 \text{ kN/m}^3$
  - b. Mutu tulangan ( $F_y$ ) = 420 MPa
  - c. Mutu beton ( $f_c'$ ) = 35 MPa
  - d. Modulus elastisitas beton ( $E$ ) =  $4700\sqrt{f_c'}$  MPa
  - e. Poisson's ratio ( $\mu$ ) = 0.2
6. Studi kasus pada skripsi ini hanya membahas penurunan kekuatan pada balok dan kolom. Balok dan kolom diasumsikan tidak mengalami *spalling*.
7. Penurunan tegangan leleh pada tulangan baja sebesar 5% dan tulangan geser tidak mengalami penurunan kekuatan.
8. Penurunan kekuatan beton sebesar 30% dan penurunan modulus elastisitas beton sebesar 20%.
9. Peraturan yang digunakan adalah:
  - a. Peraturan SNI 1726:2019 mengenai tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung.
  - b. Peraturan SNI 1727:2020 mengenai beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain.
  - c. Peraturan SNI 2847:2019 mengenai Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan.
10. Analisis desain menggunakan analisis riwayat waktu dan respons spektrum dengan percepatan tanah dasar akibat gempa yang digunakan adalah:
  - a. Gempa El-Centro N-S tahun 1940
  - b. Gempa Denpasar B-T tahun 1979
  - c. Gempa Flores tahun 1992
  - d. Gempa Parkfield N65E tahun 1966
  - e. Gempa Bucharest N-S tahun 1977
11. Perancangan dan perhitungan pondasi tidak dilakukan.

12. Spesifikasi Breising Baja yang digunakan untuk desain *Retrofit* adalah BJ37 dengan  $f_y = 240$  MPa,  $f_u = 370$  Mpa.
13. Model Breising Baja yang digunakan untuk *retrofitting* global adalah breising baja khusus. Pemodelan breising baja adalah sebagai berikut:
- Model 1



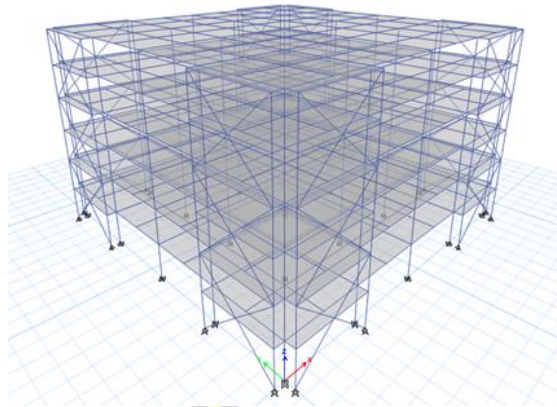
Gambar 1- 6 Gambar 3D Breising Model 1

- Model 2



Gambar 1- 7 Gambar 3D Breising Model 2

## c. Model 3



Gambar 1- 8 Gambar 3D Breising Model 3

### 1.5 Metode Penelitian

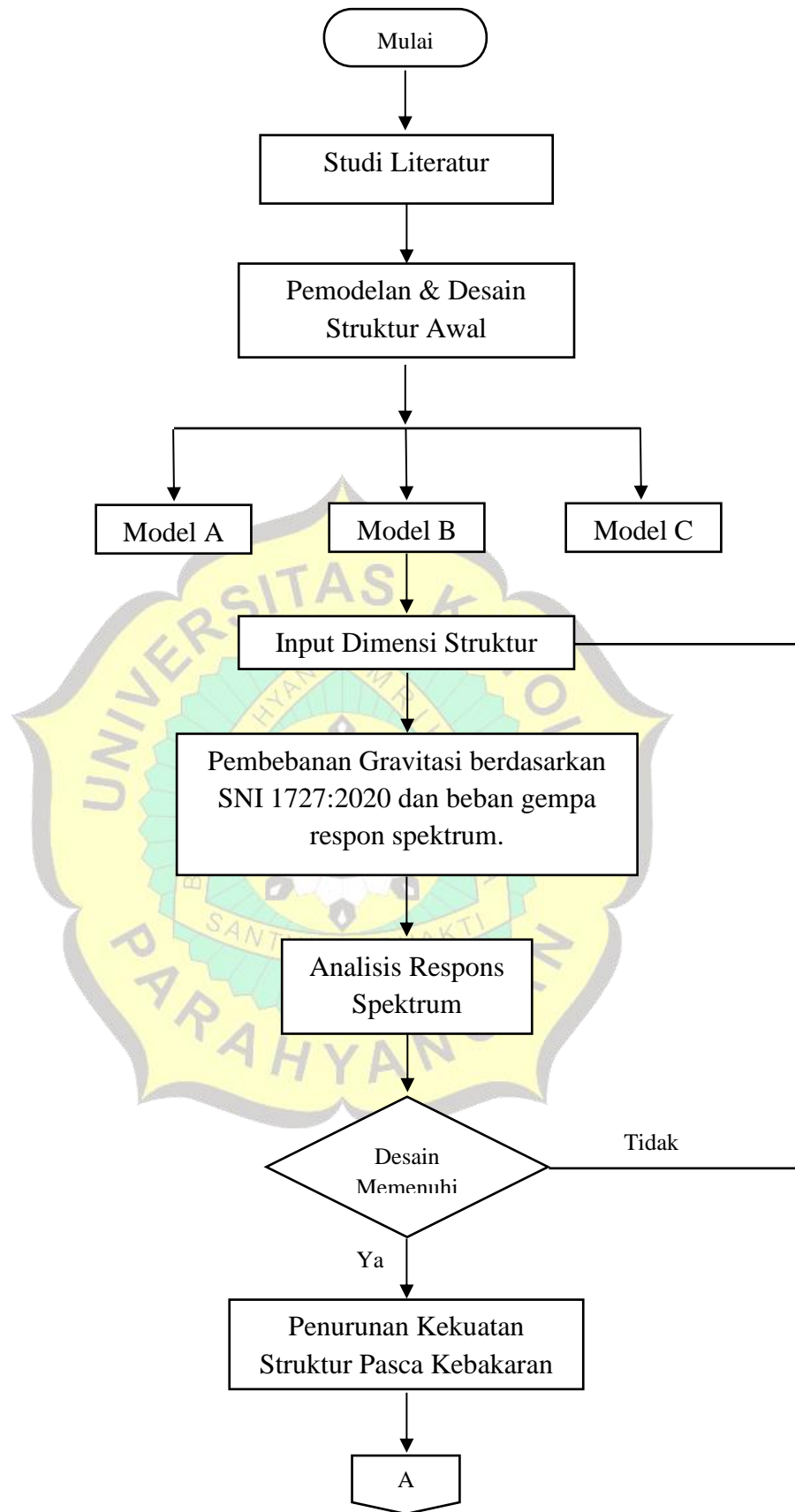
Penulisan skripsi ini menggunakan metode penelitian sebagai berikut:

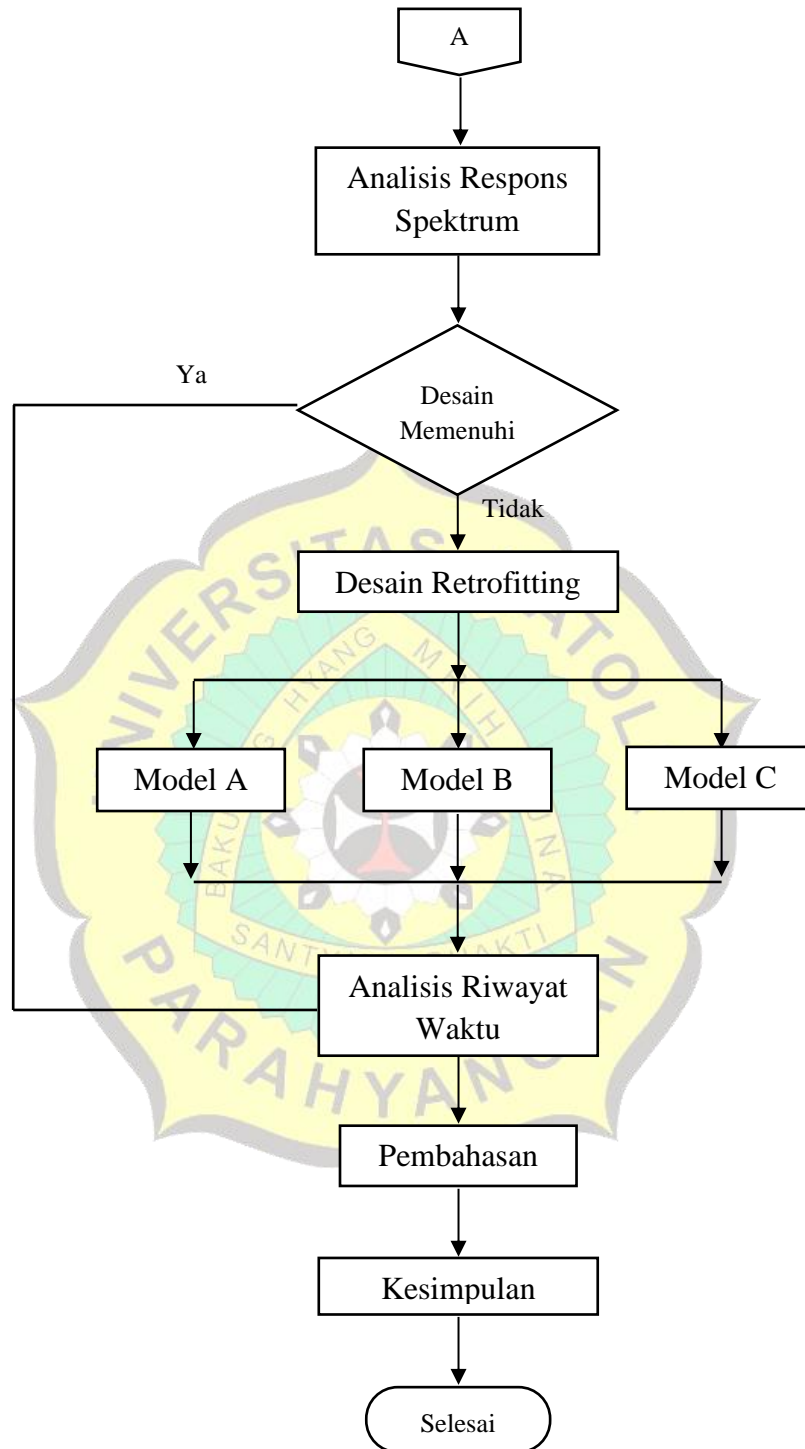
1. Studi Literatur

Studi Literatur dilakukan untuk mengumpulkan sumber-sumber yang digunakan dengan tujuan lebih memahami topik pembahasan. Sumber-sumber didapatkan dari buku, jurnal, dan peraturan yang berlaku.

2. Studi Analisis

Studi Analisis dilakukan dengan bantuan *software* ETABS dan perhitungan menggunakan *software* Smath.





## 1.6 Sistematika Penulisan

### BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, inti permasalahan, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan skripsi.

### BAB 2 STUDI PUSTAKA

Bab ini terdiri dari teori dasar dan peraturan yang digunakan berdasarkan studi literatur yang dipakai dalam penyusunan skripsi.

### BAB 3 DESAIN DAN RETROFITTING BANGUNAN

Bab ini berisi tentang perencanaan dan pemodelan struktur rangka beton bertulang menggunakan software ETABS 16 dan pemeriksaan struktur bangunan terhadap peraturan tahanan gempa yang digunakan.

### BAB 4 ANALISIS DAN HASIL RETROFITTING

Bab ini berisi tentang analisis struktur gedung yang di *retrofitting* dengan breising baja konsentris menggunakan analisis riwayat waktu

### BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan akhir dan saran-saran berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan.