

Plagiarism Report

20260419_TUGAS AKHIR ALIEF FARHAN FEBRIANTO
COPY_compressed_compressed.pdf

Document Details

Submission ID

6a550a1d6c2ec3e56a5e630e

File Size

3.0 MB

File Name

**20260419_TUGAS AKHIR ALIEF FARHAN FEBRIANTO
COPY_compressed_compressed.pdf**

Total Pages

226 Page

Account Name

ITentix Plagiarism

Total Words

46,642 Words

Submission Date

13 Jul 2026, 22:54 GMT+7

Total Characters

382,187 Characters

Release Date

13 Jul 2026, 23:12 GMT+7

Filter Options

Filter settings used in this submission report.

- Exclude Bibliography
 - Exclude Quoted Text
-

5%

Similarity

123

Matched Sources

Match Group

0% Internet sources

5% Publications

0% Submitted works (Student papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission.

1	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
2	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
3	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
4	Publication	<1%
ejournal.unisbablitar.ac.id		
5	Publication	<1%
jurnal.ugj.ac.id		
6	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
7	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
8	Publication	<1%
jurnal.polinema.ac.id		
9	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
10	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
11	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		

12	Publication	<1%
jurnal.una.ac.id		
13	Publication	<1%
etheses.uin-malang.ac.id		
14	Publication	<1%
journal.eng.unila.ac.id		
15	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
16	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
17	Publication	<1%
www.nature.com		
18	Publication	<1%
konteks17.uniba-bpn.ac.id		
19	Publication	<1%
ejournal.unsrat.ac.id		
20	Publication	<1%
ejurnal.itenas.ac.id		
21	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
22	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
23	Publication	<1%
prosiding.umy.ac.id		
24	Publication	<1%
scholar.unand.ac.id		
25	Publication	<1%
scholar.unand.ac.id		

26	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
27	Publication	<1%
journal.ipb.ac.id		
28	Publication	<1%
repository.warmadewa.ac.id		
29	Publication	<1%
journal.maranatha.edu		
30	Publication	<1%
media.neliti.com		
31	Publication	<1%
proceeding.unmuhjember.ac.id		
32	Publication	<1%
journals.itb.ac.id		
33	Publication	<1%
jurnal.polines.ac.id		
34	Publication	<1%
etd.uum.edu.my		
35	Publication	<1%
ejournal.unkhair.ac.id		
36	Publication	<1%
ejournal.um-sorong.ac.id		
37	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
38	Publication	<1%
journal.ipb.ac.id		
39	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		

40	Publication	<1%
jurnal.pasca.untad.ac.id		
41	Publication	<1%
journal.univpancasila.ac.id		
42	Publication	<1%
journal.umy.ac.id		
43	Publication	<1%
repository.uin-suska.ac.id		
44	Publication	<1%
jurnal.tekniksipil.unpand.ac.id		
45	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
46	Publication	<1%
jurnalteknik.unisla.ac.id		
47	Publication	<1%
journal.maranatha.edu		
48	Publication	<1%
journal.univpancasila.ac.id		
49	Publication	<1%
ejurnal.itenas.ac.id		
50	Publication	<1%
konteks17.uniba-bpn.ac.id		
51	Publication	<1%
jurnal.polinema.ac.id		
52	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
53	Publication	<1%
journal.um-surabaya.ac.id		

54	Publication	<1%
jurnal.polinema.ac.id		
55	Publication	<1%
repository.penerbitwidina.com		
56	Publication	<1%
jurnal.tekniksipil.unpand.ac.id		
57	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
58	Publication	<1%
jurnal.politap.ac.id		
59	Publication	<1%
journal.uir.ac.id		
60	Publication	<1%
jurnal.polinema.ac.id		
61	Publication	<1%
jurnal.unsil.ac.id		
62	Publication	<1%
journal.eng.unila.ac.id		
63	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
64	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
65	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
66	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
67	Publication	<1%
journal.umy.ac.id		

68	Publication	<1%
jurnal.syntaxliterate.co.id		
69	Publication	<1%
repository.unwira.ac.id		
70	Publication	<1%
iptek.its.ac.id		
71	Publication	<1%
ejournal.unkhair.ac.id		
72	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
73	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
74	Publication	<1%
jurnal.pasca.untad.ac.id		
75	Publication	<1%
konteks17.uniba-bpn.ac.id		
76	Publication	<1%
jurnal.polban.ac.id		
77	Publication	<1%
repository.upy.ac.id		
78	Publication	<1%
ojs.uajy.ac.id		
79	Publication	<1%
ojs.unikom.ac.id		
80	Publication	<1%
teras.unimal.ac.id		
81	Publication	<1%
scholar.unand.ac.id		

82	Publication	<1%
journal.eng.unila.ac.id		
83	Publication	<1%
ejournal.ubhara.ac.id		
84	Publication	<1%
ejournal.politeknikpu.ac.id		
85	Publication	<1%
ejournalwiraraja.com		
86	Publication	<1%
ejournalwiraraja.com		
87	Publication	<1%
scholar.unand.ac.id		
88	Publication	<1%
oa.upm.es		
89	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
90	Publication	<1%
nazharat.fah.uinjambi.ac.id		
91	Publication	<1%
eprints.umsida.ac.id		
92	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
93	Publication	<1%
japendi.publikasiindonesia.id		
94	Publication	<1%
jbkd.ft.unand.ac.id		
95	Publication	<1%
ojs.uajy.ac.id		

96	Publication	<1%
journal.unibos.ac.id		
97	Publication	<1%
ejournal.unesa.ac.id		
98	Publication	<1%
repository.penerbitwidina.com		
99	Publication	<1%
journal.uta45jakarta.ac.id		
100	Publication	<1%
eprints.ums.ac.id		
101	Publication	<1%
journal.eng.unila.ac.id		
102	Publication	<1%
jurnal.umj.ac.id		
103	Publication	<1%
scholar.ummetro.ac.id		
104	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
105	Publication	<1%
e-journal.unmas.ac.id		
106	Publication	<1%
repository.unair.ac.id		
107	Publication	<1%
repository.unika.ac.id		
108	Publication	<1%
ejournal.itn.ac.id		
109	Publication	<1%
ojs.polmed.ac.id		

110	Publication	<1%
journal.unpar.ac.id		
111	Publication	<1%
e-journal.uajy.ac.id		
112	Publication	<1%
ojs.uajy.ac.id		
113	Publication	<1%
journal.uwks.ac.id		
114	Publication	<1%
jbkd.ft.unand.ac.id		
115	Publication	<1%
journals.itb.ac.id		
116	Publication	<1%
journal.untar.ac.id		
117	Publication	<1%
journal.unesa.ac.id		
118	Publication	<1%
repository.unwira.ac.id		
119	Publication	<1%
journal.universitaspahlawan.ac.id		
120	Publication	<1%
etheses.uin-malang.ac.id		
121	Publication	<1%
scholar.unand.ac.id		
122	Publication	<1%
journals.usm.ac.id		
123	Publication	<1%
www.esis-ph.eu		

TUGAS AKHIR

**IMPLEMENTASI *BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)* SEBAGAI
MEDIA PEMODELAN DAN INTEROPERABILITAS PERENCANAAN
STRUKTUR BETON BERTULANG TAHAN GEMPA GEDUNG
APARTEMEN 'AZ-ZAHR' DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN
KHUSUS (SRPMK) DI KOTA PADANG**



ALIEF FARHAN FEBRIANTO

NPM : 22.11.0020

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS WIJAYA KUSUMA SURABAYA
SURABAYA
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST.)
di Universitas Wijaya Kusuma Surabaya

oleh :

ALIEF FARHAN FEBRIANTO

NPM : 22.11.0020

Tanggal Ujian : 23 Juni 2026

Disetujui oleh:

Pembimbing,

Dr.Ir. Utari Khatulistiani, M.T.

NIK : 93190-ET

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik,

Ketua Program Studi Teknik Sipil,

Dr. Ir. Anang Kukuh Adisusilo, ST., MT

NIP : 197802152015041001

Dr. Ir. Utari Khatulistiani, M.T.

NIK : 93190-ET

LEMBAR PENGESAHAN REVISI

Judul : Implementasi *Building Information Modeling (BIM)* Sebagai Media
Pemodelan dan Interoperabilitas Perencanaan Struktur Beton Bertulang
Tahan Gempa Apartemen “Az-Zahr” Dengan Sistem Rangka Pemikul
Momen Khusus di Kota Padang

Nama : Alief Farhan Febrianto

NPM : 22.11.0020

Tanggal Ujian : 23 Juni 2026

Disetujui oleh,
Dosen Penguji,

Mengetahui,
Dosen Pembimbing,

Dr.Ir. Soerjandani Priantoro
Machmoed, M.T.
NIK : 94245-ET

Dr. Ir. Utari Khatulistiani, M.T.
NIK : 93190-ET

LEMBAR PENGESAHAN

**Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST.)
di Universitas Wijaya Kusuma Surabaya**

oleh :

ALIEF FARHAN FEBRIANTO

NPM : 22.11.0020

Tanggal Ujian : 23 Juni 2026

Disetujui oleh:
Pembimbing,

Dr.Ir. Utari Khatulistiani, M.T.

NIK : 93190-ET

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik,

Ketua Program Studi Teknik Sipil,

Dr. Ir. Anang Kukuh Adisusilo,ST.,MT

NIP : 197802152015041001

Dr. Ir. Utari Khatulistiani, M.T.

NIK : 93190-ET

LEMBAR PENGESAHAN REVISI

Judul : Implementasi *Building Information Modeling (BIM)* Sebagai Media
 Pemodelan dan Interoperabilitas Perencanaan Struktur Beton Bertulang
 Tahan Gempa Apartemen “Az-Zahr” Dengan Sistem Rangka Pemikul
 Momen Khusus di Kota Padang

Nama : Alief Farhan Febrianto

NPM : 22.11.0020

Tanggal Ujian : 23 Juni 2026

Disetujui oleh,

Dosen Penguji,

Dosen Pembimbing,

Dr.Ir. Soerjandani Priantoro

Machmoed, M.T.

NIK : 94245-ET

Dr. Ir. Utari Khatulistiani, M.T.

NIK : 93190-ET

Mengetahui

Dosen Pembimbing,

Dr.Ir. Utari Khatulistiani, M.T.

NIK : 93190-ET

ABSTRAK

Perencanaan struktur gedung bertingkat di wilayah kegempaan tinggi memerlukan sistem yang menjamin kekuatan, kekakuan, dan daktilitas. Kota Padang memiliki risiko gempa tinggi sehingga Gedung Apartemen Az-Zahr direncanakan menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Metode konvensional berbasis gambar dua dimensi memiliki keterbatasan, seperti rendahnya koordinasi antar-disiplin, tingginya potensi kesalahan akibat revisi berulang, dan kurang optimalnya interoperabilitas data. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengimplementasikan *Building Information Modeling* (BIM) dalam perencanaan struktur beton bertulang tahan gempa melalui integrasi Autodesk Revit dan *Robot Structural Analysis Professional* (RSAP).

Metode penelitian diawali studi literatur dan pengumpulan data, dilanjutkan *preliminary design* elemen struktur, pemodelan tiga dimensi menggunakan Autodesk Revit pada *Level of Development* (LOD) 300, serta interoperabilitas dari model analitis revit ke RSAP untuk analisis beban gravitasi dan gempa. Tahapan berikutnya meliputi evaluasi simpangan antar lantai (*inter-story drift*), perencanaan struktur primer, sekunder, dan pondasi, serta sinkronisasi dua arah antara Autodesk Revit dan RSAP untuk menjaga konsistensi model selama proses perencanaan.

Hasil perencanaan menunjukkan bahwa penerapan BIM menghasilkan model struktur terintegrasi yang meningkatkan akurasi koordinasi data, mempermudah revisi desain, dan mendukung efisiensi analisis. Struktur yang direncanakan memenuhi konsep *Strong Column-Weak Beam*, persyaratan daktilitas SRPMK, serta batas simpangan antar lantai sesuai SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Dengan demikian, integrasi Autodesk Revit dan RSAP melalui pendekatan BIM menjadi metode efektif dalam perencanaan struktur beton bertulang tahan gempa pada gedung bertingkat di wilayah dengan tingkat seismisitas tinggi..

Kata Kunci: *Building Information Modeling* (BIM), Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), Struktur beton bertulang, *Level of Development* (LOD), Interoperabilitas

ABSTRACT

The structural design of high-rise buildings in high-seismicity regions demands systems that guarantee strength, stiffness, and ductility. Given that Padang City possesses a high seismic risk, the Az-Zahr Apartment Building is designed utilizing the Special Reinforced Concrete Moment Frames (SRCMF / SRPMK) system. Conventional methods based on two-dimensional drawings exhibit limitations, such as deficient inter-disciplinary coordination, a high potential for errors due to repetitive design revisions, and sub-optimal data interoperability. Therefore, this study aims to implement Building Information Modeling (BIM) in the design of earthquake-resistant reinforced concrete structures through the integration of Autodesk Revit and Robot Structural Analysis Professional (RSAP).

The research methodology initiates with a literature study and data collection, followed by the preliminary design of structural elements, three-dimensional modeling utilizing Autodesk Revit at Level of Development (LOD) 300, and the interoperability transfer from the Revit analytical model to RSAP for gravity and seismic load analyses. The subsequent stages encompass the evaluation of inter-story drift, the structural design of primary, secondary, and foundation elements, as well as the bidirectional synchronization between Autodesk Revit and RSAP to maintain model consistency throughout the design process.

The design results demonstrate that the implementation of BIM produces an integrated structural model that enhances data coordination accuracy, streamlines design revisions, and supports analysis efficiency. The planned structure satisfies the Strong Column–Weak Beam concept, the ductility requirements of SRPMK, and the inter-story drift limitations in compliance with SNI 1726:2019 and SNI 2847:2019. Consequently, the integration of Autodesk Revit and RSAP through a BIM approach serves as an effective method in the design of earthquake-resistant reinforced concrete structures for high-rise buildings in regions with high seismicity levels.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Special Reinforced Concrete Moment Frames (SRCMF), Reinforced concrete structure, Level of Development (LOD), Interoperability

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat-Nya Tugas Akhir berjudul Implementasi *Building Information Modeling (BIM)* Sebagai Media Pemodelan dan Interoperabilitas Perencanaan Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa Apartemen “Az-Zahr” Dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus di Kota Padang ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Utari Khatulistiani, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Wijaya Kusuma Surabaya sekaligus Dosen Pembimbing Utama, yang dengan penuh kesabaran, ketelitian, dan dedikasi tinggi telah meluangkan waktu serta mencurahkan ilmu berharganya demi mengarahkan, mengoreksi, dan membimbing penulis dari awal pemodelan hingga Tugas Akhir ini dapat rampung dengan hasil terbaik.
2. Ibu Andaryati, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Proposal Tugas Akhir, yang telah meletakkan pondasi berpikir ilmiah bagi penulis sejak awal perancangan ide, serta senantiasa memberikan arahan, motivasi, dan koreksi konstruktif sehingga penelitian ini memiliki arah ruang lingkup yang jelas dan terstruktur.
3. Bapak Dr.Ir. Siswoyo, MT. Selaku dosen wali yang telah membimbing dan mengarahkan penulis selama berkuliah di Fakultas Teknik Universitas Wijaya Kusuma Surabaya.
4. Dr. Ir. Soerjandani Priantoro Machmoed, M.T. selaku Dosen Penguji sekaligus mentor penulis dalam berorganisasi, yang tidak hanya memberikan koreksi tajam dan arahan akademis demi kesempurnaan Tugas Akhir ini, tetapi juga telah meluangkan waktu untuk mendidik, menginspirasi, serta menemani proses pendewasaan penulis dalam dunia organisasi kampus sebagai bekal kepemimpinan di masa depan.
5. Pemerintah Republik Indonesia, khususnya Pusat Layanan Pembiayaan Pendidikan (Puslapdik) Kemendikbudristek, atas kepercayaan dan dukungan finansial melalui program Beasiswa Kartu Indonesia Pintar Kuliah (KIP-Kuliah), yang telah menjadi jembatan utama bagi penulis dalam menempuh dan menyelesaikan studi pendidikan tinggi di Fakultas Teknik Universitas Wijaya Kusuma Surabaya.
6. Kedua Orang tua, Bapak Sumargo dan Ibu Muji Astuti, yang selalu memberikan

dukungan, semangat, do'a dan selalu mengorbankan segalanya demi kebahagiaan dan kesuksesan anak-nya.

7. Adik tersayang Isnaini Flora Febriany, yang selalu memberikan do'a dan semangat
8. Seluruh Kawan-kawan di Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Wijaya Kusuma Surabaya maupun Kawan-kawan di **Forum Komunikasi Mahasiswa Teknik Sipil Indonesia** Wilayah IX Jawa Timur yang memberi semangat dan juga berbagi ilmu.
9. Kopi Kenangan Mantan, dengan dua menu favorit andalan penulis yaituAmericano dan Butterscotch Aren Latte, yang selalu sukses menjadi pereda penat sekaligus penyambung nyawa dan fokus penulis dalam menuntaskan lembar demi lembar Tugas Akhir yang sempat terasa tanpa ujung.
10. Band Perunggu, yang lewat barisan lirik magis dan alunan musik distorsinya di dalam playlist andalan penulis mulai dari "Pikiran yang Matang", "33x", "Berhasil", hingga "Aku Ada Untukmu" selalu setia menyuarakan rasa lelah sekaligus memberikan suntikan energi di kala jenuh melanda; teman begadang terbaik yang sukses memaksa penulis untuk menolak menyerah dan terus melangkah hingga Bab Akhir ini tuntas
11. Pihak - pihak yang pernah memandang sebelah mata dan meragukan kapasitas penulis; terima kasih yang tak terhingga atas segala skeptisisme kalian. Sudut pandang meremehkan yang kalian berikan justru sukses menjadi motivator terbaik yang menempa mental penulis untuk melangkah lebih jauh. Ketahuilah bahwa keberhasilan hari ini bukanlah akhir dari pembuktian penulis, melainkan awal dari pembuktian nyata bahwa batas kemampuan penulis berada jauh di atas prediksi rendah yang pernah kalian bayangkan.
12. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna; kritik dan saran membangun sangat penulis harapkan agar karya ini semakin bermanfaat bagi semua pihak..

Surabaya, 22 Juni 2026

Alief Farhan Febrianto

DAFTAR ISI

91	LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
	LEMBAR PENGESAHAN REVISI	iii
	LEMBAR PENGESAHAN REVISI	v
	ABSTRAK.....	vi
	KATA PENGANTAR	viii
	DAFTAR ISI	x
	DAFTAR GAMBAR.....	xiv
	DAFTAR TABEL.....	xvi
	BAB I PENDAHULUAN	17
	1.1. Latar Belakang.....	17
	1.2. Rumusan Masalah	19
	1.3. Batasan Masalah	19
	1.4. Maksud dan Tujuan	20
	1.5. Manfaat.....	21
	BAB II TINJAUAN PUSTAKA	22
	2.1. Konsep & Evolusi <i>Building Information Modeling (BIM)</i>	22
	2.2. Konsep <i>Level of Development (LOD)</i> dalam Pemodelan Struktural.....	22
	2.2.1. Level of Development 100 (LOD 100 - Conceptual Design)	22
	2.2.2. Level of Development 200 (LOD 200 - Schematic Design)	23
	2.2.3. Level of Development 300 (LOD 300 - Detailed Design)	24
	2.2.4. Level of Development 350 (LOD 350 - Construction Documentation).....	25
	2.3. Perbandingan Antara <i>BIM</i> dan CAD Konvensional	27
	2.4. Teori dan Konsep Struktur Gedung Daktil	28
	2.4.1. Filosofi Perencanaan Bangunan Tahan Gempa	28
	2.4.2. Klasifikasi Daktilitas Menurut SNI 2847:2019 dan SNI 1726:2019.....	28
	2.4.3. Mekanisme Strong Column – Weak Beam.....	31
	2.5. Sistem Penahan Gempa	31
	2.5.1. Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM).....	31
	2.5.2. Sistem Dinding Geser (Shear Wall).....	32
	2.5.3. Sistem Ganda (Dual System).....	33
	2.6. Teori dan Pemodelan SRPMK dalam <i>BIM</i>	34
	2.7. Sistem Rangka Untuk Perencanaan Struktur Gedung	35
	2.8. Perencanaan Tahan Gempa Menggunakan <i>BIM</i>	36
	2.9. Resiko Gempa Tinggi	37
	2.10. Klasifikasi Situs.....	38
	2.11. Menentukan Respon Spektra	40
	2.12. Menentukan Kategori Desain Seismik	44
	2.13. Pemilihan Sistem Struktur dan Parameter Sistem (R , C_d , Ω).....	45
	2.14. Perhitungan Geser Dasar Seismik	47
	2.15. Distribusi Vertikal Gaya Seismik	48

2.16.	Penentuan Batas Simpangan Antar Lantai.....	49
2.17.	Detail Sambungan Kolom Balok Untuk daktilitas Tinggi.....	50
2.18.	Konfigurasi Ketidakberaturan Struktur Gedung.....	51
2.18.1.	Ketidakteraturan Horizontal	51
2.18.2.	Ketidakteraturan Vertikal.....	52
2.19.	<i>Parametric Design</i> dan Optimasi Elemen Beton Bertulang.....	54
2.20.	Integrasi <i>BIM</i> Dengan <i>Software</i> Analisa Struktur	54
BAB III	METODE PENELITIAN.....	55
3.1	Diagram Alir Rencana	55
3.2	Penjelasan Diagram Alir Rencana	57
BAB IV	<i>PRELIMINARY DESIGN</i> DAN PEMODELAN <i>BIM</i>.....	65
4.1.	Data Perencanaan	65
4.2.	Perencanaan Dimensi Balok.....	65
4.2.1.	Perencanaan Dimensi Balok Induk.....	65
4.2.2.	Perencanaan Dimensi Balok Anak	65
4.3.	Perencanaan Dimensi Plat	66
4.3.1.	Perencanaan Plat Atap	66
4.3.2.	Perencanaan Plat Lantai.....	71
4.4.	Perencanaan Dimensi Kolom	75
4.4.1.	Pembebanan Pada Kolom.....	76
4.4.2.	Menentukan Dimensi Pada Kolom.....	77
4.5.	Pemodelan Awal Pada <i>BIM</i>	78
4.5.1.	Persiapan Data Pemodelan	78
4.5.2.	Pembuatan Level dan Grid Bangunan	79
4.5.3.	Pemodelan Kolom	81
4.5.4.	Pemodelan Balok.....	82
4.5.5.	Pemodelan Pelat Lantai	83
4.5.6.	Penerapan Parameter <i>BIM</i>	83
4.5.7.	Hasil Model Awal	84
4.6.	Rekapitulasi Model Awal.....	85
4.6.1.	Rekapitulasi Dimensi Elemen Struktur Awal	85
4.6.2.	Rekapitulasi Material Struktur.....	86
4.6.3.	Rekapitulasi Geometri Model Awal.....	87
BAB V	IMPLEMENTASI PARAMETRIK DAN INTEROPERABILITAS	88
5.1.	Alur Kerja (Workflow) Perencanaan Berbasis <i>BIM</i>	88
5.1.1	Pemodelan Fisik dan Geometri Struktur (Autodesk Revit).....	88
5.1.2	Otomatisasi Model Analitis (Autodesk Revit)	89
5.1.3	Interoperabilitas Ekspor Model ke <i>RSAP</i>	89
5.1.4	Analisis & Desain Struktur (<i>RSAP</i>)	89
5.1.5	Verifikasi & Perhitungan Penulangan (<i>RSAP</i>).....	89
5.1.6	Sinkronisasi Balik Dua Arah (Revit).....	90
5.2	Penerapan Elemen Parametrik dan <i>Level of Development (LOD)</i> 300	90

5.3. Analisis Interoperabilitas Dua Arah (<i>Bi-Directional Synchronization</i>).....	91
5.4. Evaluasi Komparatif Aktivitas Desain (Konvensional (2D CAD) vs <i>BIM</i>)	93
BAB VI STRUKTUR SEKUNDER	96
6.1. Sekunder	96
6.2. Perencanaan Plat Atap	96
6.2.1. Pembebanan Plat Atap	96
6.2.2. Perhitungan Momen Plat Atap.....	96
6.2.3. Perhitungan Penulangan Plat Atap	98
6.3. Perencanaan Pelat Lantai.....	102
6.3.1. Pembebanan Plat Lantai	102
6.3.2. Perhitungan Momen Plat Lantai	102
6.3.3. Perhitungan Momen Plat Lantai	104
6.4. Perencanaan Balok Anak Atap	109
6.4.1. Pembebanan Balok Anak Atap	109
6.4.2. Penulangan Lentur Balok Anak Atap (BA 25/40cm)	113
6.4.3. Penulangan Geser Balok Anak Atap (BA 25/40cm).....	115
6.5. Perencanaan Balok Anak Lantai.....	117
6.5.1. Pembebanan Balok Anak Lantai.....	117
6.5.2. Penulangan Lentur Balok Anak Lantai (BA 25/40 cm).....	121
6.5.3. Penulangan Geser Balok Anak Lantai (BA 25/40).....	123
6.6. Perencanaan Tangga	126
6.6.1. Pembebanan Tangga	128
6.6.2. Analisa Statika Tangga	129
6.6.3. Penulangan Plat Tangga.....	131
6.6.4. Penulangan Plat Bordes	132
6.6.5. Perencanaan Balok Bordes	133
6.7. Perencanaan Balok Penggantung Lift.....	137
6.7.1. Koefisien Kejut Beban Hidup Oleh Crane	138
6.7.2. Pembebanan Balok Penggantung Lift	138
6.7.3. Analisa Statik Balok Lift	139
6.7.4. Penulangan Balok Penggantung Lift	141
BAB VII STRUKTUR PRIMER.....	146
7.1. Struktur Primer	146
7.2. Data Perencanaan Struktur Primer	146
7.3. Pembebanan.....	147
7.3.1. Perhitungan Beban Gravitasi	147
7.3.2. Perhitungan Beban Gempa	151
7.4. Perencanaan Balok Induk	161
7.3.3. Penulangan Lentur Balok Induk.....	164
7.3.4. Penulangan Geser Balok Induk	168
7.3.5. Penulangan Torsi Balok Induk.....	172
7.5. Perencanaan Kolom.....	173

7.5.1.	Desain Tulangan Memanjang Kolom	174
7.5.2.	Perhitungan Kuat Tekan Maksimal Kolom	177
7.5.3.	Syarat Pendetailan Kolom	177
7.5.4.	Pendetailan Kolom Strong Column Weak Beam.....	178
7.5.5.	Perhitungan Tulangan Confinement	180
7.5.6.	Perhitungan Tulangan Geser.....	182
7.5.7.	Sambungan Lewatan Tulangan Pada Kolom.....	184
7.6.	Desain Hubungan Balok Kolom.....	184
7.6.1.	Desain Hubungan Balok Kolom Terkekang Empat Balok	185
7.7.1.	Desain Hubungan Balok Kolom Terkekang Tiga atau Dua Balok	186
BAB VIII PERENCANAAN PONDASI.....		189
8.1.	Umum	189
8.2.	Daya Dukung Tiang Pancang	189
8.3.	Perencanaan Pondasi Tiang Pancang.....	189
8.3.1.	Daya Dukung Tiang Pondasi Tipe Satu Berdasarkan Kekuatan Material .	190
8.3.2.	Daya Dukung Tiang Pondasi Berdasarkan Kekuatan Tanah	190
8.3.3.	Berdasarkan Data Sondir (CPT)	191
8.3.4.	Kebutuhan Tiang Pancang Pada Pondasi	193
8.3.5.	Perhitungan Efisiensi Kelompok Tiang Pancang	197
8.3.6.	Kontrol Beban Maksimum 1 Tiang Pancang.....	200
8.3.7.	Penurunan (settlement) Pondasi Tiang Pancang.....	202
8.4.	Perencanaan <i>Pile Cap</i>	204
8.4.1.	Kontrol Tebal <i>Pile Cap</i>	205
8.4.2.	Kontrol Geser Pondasi.....	205
8.4.3.	Penulangan <i>Pile Cap</i>	206
8.5.	Perencanaan Sloof	209
8.5.1.	Analisa Gaya Dalam	210
8.5.2.	Tulangan Longitudinal.....	210
8.5.3.	Tulangan Geser	211
BAB IX KESIMPULAN DAN SARAN		212
9.1.	Kesimpulan.....	212
9.2.	Saran	213
DAFTAR PUSTAKA		214
LAMPIRAN		217

DAFTAR GAMBAR

30

1

Gambar 2. 1 Detail penulangan kolom pada Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)	29
Gambar 2. 2 Detail penulangan kolom pada Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)	30
Gambar 2. 3 Detail penulangan kolom pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)	30
Gambar 2. 4 Sistem Struktur Beton Bertulang Penahan Gempa Bumi	32
Gambar 2. 5 Sistem Struktur Beton Bertulang Penahan Gempa Bumi	33
Gambar 2. 6 Sistem Struktur Beton Bertulang Penahan Gempa Bumi	34
Gambar 2. 7 Spektrum Respon Desain	42
Gambar 2. 8 Grafik Respon Spektra Lokasi Kota Padang	43
Gambar 2. 9 Ketidakberaturan Horizontal	52
Gambar 2. 10 Ketidakberaturan Vertikal	53
Gambar 3. 1 Diagram Alir Perencanaan	55
Gambar 3. 2 Denah Lantai 1	58
Gambar 3. 3 Denah Lantai 2	59
Gambar 3. 4 Denah Lantai 3-10	59
Gambar 3. 5 Tampak Depan	60
Gambar 3. 6 Tampak Belakang	60
Gambar 3. 7 Tampak Samping Kanan	61
Gambar 3. 8 Tampak Samping Kiri	61
Gambar 4. 1 Perencanaan Plat Atap	66
Gambar 4. 2 Penampang Balok Induk Plat Atap	67
Gambar 4. 3 Penampang Balok Anak Plat Atap	69
Gambar 4. 4 Penampang Balok Anak Plat Lantai	73
Gambar 4. 5 Tributary area Kolom	75
Gambar 4. 6 Pemodelan Level	80
Gambar 4. 7 Pemodelan Grid	81
Gambar 4. 8 Pemodelan Kolom	82
Gambar 4. 9 Pemodelan Balok dan Plat	83
Gambar 4. 10 Model awal Pada BIM	84
Gambar 5. 1 Perencanaan Plat Lantai	71
Gambar 5. 2 Penampang Balok Plat Lantai	72
Gambar 6. 1 Tipe Plat	97
Gambar 6. 2 Tipe Plat Lantai	103
Gambar 6. 3 Pembebanan Trapesium Pada Balok Anak Atap (25/40)	110
Gambar 6. 4 Pembebanan Segitiga Pada Balok Anak Atap (25/40)	112
Gambar 6. 5 Pembebanan Trapesium Pada Balok Anak Lantai (25/40)	118
Gambar 6. 6 Pembebanan Segitiga Pada Balok Anak Lantai (25/40)	120
Gambar 6. 7 (a) Denah Tangga (b) Sket Tangga Tampak samping	127

Gambar 6. 8 Sket Pembebanan Tangga	129
Gambar 6. 9 Analisa Statik Tangga	130
Gambar 6. 10 Statika Pembebanan.....	139
Gambar 6. 11 Momen Lentur (M_u) Pada Balok Penggantung Lift.....	139
Gambar 6. 12 Gaya Geser (V_u) Pada Balok Penggantung Lift.....	139
Gambar 6. 13 Gaya Dalam Lapangan Balok Penggantung Lift.....	140
Gambar 6. 14 Gaya Dalam Tumpuan Balok Penggantung Lift.....	140
Gambar 7. 1 Respon Spektrum Kota Padang	153
Gambar 7. 2 Perhitungan Beban Gempa Statik Ekuivalen (F_i) Tiap Lantai	154
Gambar 7. 3(a)Gaya Gempa Tiap Lantai Arah X ;(b)Gaya Gempa Tiap Lantai Arah Y	155
Gambar 7. 4 Kombinasi Pembebanan	156
Gambar 7. 5 Bentuk 3D Gedung Apartemen Az Zahr.....	157
Gambar 7. 6 Simpangan Simpangan Yang Terjadi di arah X.....	158
Gambar 7. 7 Simpangan Yang Terjadi di arah Y	158
Gambar 7. 8 simpangan tiapLantai Pada sistem Rangka Pemikul Momen Khusus.....	159
Gambar 7. 9 Analisis Modal	161
Gambar 7. 10 Diagram Geser	170
Gambar 7. 11 Nomogram Faktor Kekakuan Kolom (Struktur Tidak Bergoyang)	175
Gambar 7. 12 <i>Output</i> analisa Kolom Menggunakan SPColumn.....	176
Gambar 7. 13 Diagram Interaksi Gaya Aksial dan Momen Pada Garis spColumn Nilai M_{nc}	180
Gambar 8. 1 Ujung Tia Pancang Yang Mengalami Keruntuhan Geser	190
Gambar 8. 2 Pondasi.....	197
Gambar 8. 3 Denah Pondasi	201
Gambar 8. 4 Diagram Interaksi Mn-Pn (<i>Output</i> spColumn)	211

DAFTAR TABEL

111	Tabel 2. 1 Klasifikasi Situs	39
	Tabel 2. 2 Koefisien Situs (F_a)	40
	Tabel 2. 3 Koefisien situs (F_v)	41
	Tabel 2. 4 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek.....	44
21	Tabel 2. 5 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik	45
	Tabel 2. 6 Faktor R , C_d , dan Ω untuk sistem pemikul gaya seismic.....	46
	Tabel 2. 7 Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung.....	46
72	Tabel 2. 8 Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x	47
	Tabel 2. 9 Simpangan antar tingkat izin, $\Delta a a. b$	49
	Tabel 2. 10 Ketidakberaturan horizontal pada struktur	52
	Tabel 2. 11 Ketidakberaturan vertikal pada struktur.....	53
	Tabel 4. 1 Data Pemodelan	79
	Tabel 4. 2 Level bangunan pada model <i>BIM</i>	79
	Tabel 4. 3 Parameter Elemen Struktur Pada Model <i>BIM</i>	84
	Tabel 4. 4 Rekapitulasi Elemen Struktur	85
	Tabel 4. 5 Rekapitulasi Material Struktur.....	86
	Tabel 4. 6 Rekapitulasi Geometri Model Awal.....	87
	Tabel 5. 1	91
	Tabel 5. 2 Komparasi Aktivitas Desain Metode Konvensional vs Metode Integrasi <i>BIM</i> ..	93
	Tabel 6. 1 Tabel Momen Plat Atap	97
	Tabel 6. 2 Momen Plat Lantai	104
	Tabel 6. 3 Rekapitulasi Penulangan Balok Anak dan Balok Lantai	126
	Tabel 6. 4 Perletkan Momen Tangga	130
	Tabel 6. 5 Perletakan Momen Bordes.....	130
	Tabel 6. 6 Rekapitulasi Balok Penggantung Lift.....	145
	Tabel 7. 1 Berat Tiap Lantai	150
	Tabel 7. 2 Perhitungan Jenis Tanah Kota Padang.....	152
	Tabel 7. 3 Tabel <i>T-Rayleigh</i> Arah X	159
	Tabel 7. 4 Tabel <i>T-Rayleigh</i> Arah Y	160
	Tabel 7. 5 Rekapitulasi Balok Induk	173
	Tabel 7. 6 Tabel Gaya Dalam Kolom	174
	Tabel 7. 7 Rekapitulasi Pengecekan SCWB pada HBK Interior dan Eksterior Tiap Lantai	187

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Secara geotektonik, wilayah Indonesia merupakan salah satu zona paling dinamis di dunia karena berada pada titik konvergensi tiga lempeng tektonik mayor: Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Kota Padang, yang terletak di pesisir barat Sumatera, memiliki profil risiko seismik yang sangat signifikan akibat aktivitas subduksi lempeng pada zona *Mentawai Megathrust* serta keberadaan sesar darat aktif. Kondisi seismisitas ini memberikan tantangan teknis yang krusial dalam perencanaan infrastruktur, khususnya untuk bangunan gedung bertingkat seperti Apartemen "Az-Zahr" yang direncanakan memiliki elevasi struktur hingga 10 lantai.

Dalam merespons risiko tersebut, regulasi perencanaan struktur di Indonesia telah menetapkan standar yang ketat melalui SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Untuk wilayah dengan tingkat seismisitas desain yang tinggi, penggunaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) merupakan sebuah keharusan teknis guna memastikan struktur memiliki daktilitas memadai melalui kepatuhan terhadap SNI 2847:2019 mengenai Persyaratan Beton Struktural. Implementasi SRPMK ini menuntut tercapainya mekanisme sendi plastis yang terencana melalui kriteria *Strong Column-Weak Beam (SCWB)* serta pemenuhan aspek kekakuan (*stiffness*) berupa batasan simpangan antar lantai izin (*inter-story drift*). Berdasarkan regulasi, simpangan yang terjadi tidak boleh melampaui batas (Δ) sebesar 0,020h guna menjamin stabilitas struktur dan meminimalisir kerusakan pada elemen non-struktural saat terjadi beban gempa rencana.

Namun, dalam praktiknya, perencanaan SRPMK pada gedung 10 lantai di zona gempa tinggi melibatkan variabel teknis yang sangat kompleks dan iteratif. Perencana sering kali dihadapkan pada hambatan koordinasi data saat mentransfer model fisik ke dalam *Software* analisis struktur, yang berpotensi menyebabkan fragmentasi informasi. Oktavianus et al. (2024) menekankan bahwa penggunaan alur kerja konvensional berbasis 2D CAD pada bangunan tinggi memiliki risiko *human error* yang signifikan dalam manajemen revisi dan integritas data dibandingkan dengan metode berbasis objek digital.

Sebagai solusi atas kompleksitas tersebut, penelitian ini mengimplementasikan metodologi *Building Information Modeling (BIM)*. *BIM* diposisikan sebagai transformasi

paradigma dari sekadar dokumentasi grafis menjadi pemodelan objek yang memiliki integritas informasi tinggi. Fokus utama perencanaan ini adalah mengoptimalkan efisiensi alur kerja (*workflow*) dan presisi teknis melalui integrasi dua perangkat lunak utama dari ekosistem Autodesk, yaitu Autodesk Revit dan Robot Structural Analysis Professional (RSAP). Penggunaan *BIM* memungkinkan sinkronisasi antara model fisik dan analitis secara *real-time*, yang menurut Salsabila & Arya (2024), mampu mereduksi waktu pemodelan ulang secara signifikan saat terjadi perubahan parameter dimensi struktur.

Autodesk Revit digunakan sebagai platform pemodelan parametrik untuk membangun *Physical Model* dan *Analytical Model* secara simultan hingga *Level of Development* (LOD) 300. LOD 300 didefinisikan sebagai tingkat kedalaman pemodelan di mana elemen struktur direpresentasikan secara spesifik sebagai sistem atau objek yang akurat dalam hal kuantitas, dimensi geometri, lokasi koordinat, serta orientasi. Pada level ini, elemen model tidak lagi bersifat generik, melainkan telah memiliki data teknis yang matang sehingga siap digunakan untuk analisis rekayasa dan dokumentasi konstruksi. Hal ini menjamin konsistensi basis *data tunggal* (*Single Source of Truth*) yang memuat informasi geometri dan properti material beton f_c 35 MPa sesuai standar pembebanan SNI 1727:2020 serta spesifikasi baja tulangan berdasarkan SNI 2052:2017.

Efisiensi perencanaan ini diperkuat dengan pemanfaatan RSAP untuk analisis beban lateral dan dinamis menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Wang & Zhang (2024) menyatakan bahwa integrasi simulasi beban lateral dalam ekosistem *BIM* sangat mempermudah perencana dalam melakukan validasi kriteria *drift* (simpangan) dan performa struktur pada bangunan beton bertulang secara komprehensif.

Keunggulan teknis yang menjadi determinan utama dalam perencanaan ini terletak pada manifestasi Interoperabilitas melalui fitur bi-directional synchronization antara Revit dan RSAP. Integrasi ini menciptakan sebuah ekosistem perencanaan yang bersifat *closed-loop*, di mana setiap modifikasi penampang hasil validasi pada RSAP guna memenuhi kriteria SCWB serta limitasi simpangan antar lantai dapat diartikulasikan kembali ke dalam model fisik Revit secara *real-time* tanpa adanya redundansi data. Meskipun objek studi ini merupakan bangunan swasta, implementasi *BIM* tetap menjadi relevan sebagai bentuk adaptasi terhadap kemajuan industri konstruksi 4.0 di Indonesia yang menuntut rigiditas parameter teknis dan integritas struktural pada bangunan berkategori risiko tinggi (*high-rise building*). Dengan demikian, penerapan duet Revit dan RSAP diharapkan dapat menghasilkan perencanaan struktur Apartemen "Az-Zahr" yang tidak hanya efisien secara

durasi, namun juga tangguh dan patuh terhadap seluruh regulasi teknis SRPMK di Kota Padang.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan paparan latar belakang tentang penerapan *Building Information Modeling* (*BIM*) dalam perancangan struktur beton bertulang Gedung Apartemen “Az-Zahr” menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) di Kota Padang, maka persoalan yang akan dikaji adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana penerapan *Building Information Modeling* (*BIM*) dapat meningkatkan akurasi koordinasi antar-elemen dan mereduksi siklus revisi dalam alur perencanaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) pada gedung Apartemen Az-Zahr?
2. Sejauh mana integrasi model *BIM* memfasilitasi analisis beban gempa yang presisi, penyesuaian dimensi elemen SRPMK agar memenuhi kriteria kapasitas, serta perhitungan simpangan antar lantai (*inter-story drift*) untuk menjamin ketahanan struktural Apartemen Az-Zahr pada kondisi Klasifikasi Situs Tanah Lunak (Situs SE) dengan Kategori Desain Seismik (KDS) E di Kota Padang?
3. Bagaimana *BIM* digunakan untuk memverifikasi dan mensimulasikan perilaku sambungan kolom – balok pada SRPMK, termasuk kurasi detailing tulangan sesuai persyaratan daktilitas SNI 2847 : 2019 dan distribusi simpangan, guna memastikan model digital sepenuhnya memenuhi standar ketahanan gempa nasional ?

1.3. Batasan Masalah

Pembahasan dalam Tugas Akhir ini difokuskan pada aspek perencanaan struktur beton bertulang gedung Apartemen “Az-Zahr” di Kota Padang dengan menggunakan pendekatan *Building Information Modeling* (*BIM*) dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Secara lebih rinci, ruang lingkup penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Pembuatan model 3D dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Revit yang difokuskan secara eksklusif pada elemen struktur utama beton bertulang (balok, kolom, dan pelat). Detail arsitektural, elemen *Mechanical, Electrical, and Plumbing* (MEP), serta elemen non-struktural lainnya tidak termasuk dalam lingkup pembahasan.

2. Analisis respons gempa dibatasi pada evaluasi simpangan antar lantai (*inter-story drift*) berdasarkan parameter beban gempa Kota Padang yang merujuk pada pedoman SNI 1726:2019.
3. Pendetailan elemen struktur dan persyaratan daktilitas tinggi mengacu sepenuhnya pada SNI 2847:2019, dengan fokus utama pada pemodelan penulangan sambungan balok-kolom SRPMK. Penelitian ini tidak membahas elemen beton prategang maupun struktur dinding penahan tanah (*retaining wall*).
4. Iterasi atau perubahan dimensi elemen struktur (balok, kolom, dan pelat) dilakukan semata-mata untuk mencapai kapasitas penampang yang memadai serta memenuhi syarat kekakuan (simpangan antar lantai). Tidak dilakukan optimasi untuk pengurangan volume material atau penghematan jumlah tulangan.
5. Penelitian ini tidak membahas estimasi biaya (RAB), metode pelaksanaan konstruksi, maupun manajemen proyek. Perbandingan dengan metode konvensional hanya dibatasi pada aspek alur kerja (*workflow*) dan akurasi koordinasi, tidak mencakup perbandingan durasi pengerjaan atau biaya secara kuantitatif.

1.4. Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengimplementasikan metodologi *Building Information Modeling (BIM)* dalam proses perencanaan struktur beton bertulang pada Gedung Apartemen “Az-Zahr”. Mengingat lokasi pembangunan berada di Kota Padang yang dikategorikan sebagai wilayah dengan risiko seismik sangat tinggi akibat kedekatannya dengan jalur patahan aktif dan zona *megathrust* maka perencanaan ini menuntut tingkat akurasi dan rigiditas yang ekstrem. Penggunaan *BIM* dimaksudkan untuk memfasilitasi analisis Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) secara lebih komprehensif, guna memastikan integritas struktural gedung 10 lantai tersebut tetap terjaga di zona gempa kritis melalui alur kerja yang terintegrasi, akurat, dan efisien:

1. Menganalisis efektivitas penerapan *BIM* dalam meningkatkan akurasi koordinasi antar-elemen struktur serta kemampuannya dalam mereduksi siklus revisi desain pada perencanaan SRPMK dibandingkan dengan alur kerja konvensional.
2. Mengevaluasi integrasi model *BIM* (interoperabilitas Revit-RSAP) dalam memfasilitasi analisis gempa dinamis yang presisi, serta melakukan validasi terhadap pemenuhan

- kriteria kapasitas penampang dan batasan simpangan antar lantai (*inter-story drift*) sesuai standar SNI 1726:2019 pada zona gempa tinggi.
3. Memverifikasi pemodelan detail penulangan (*detailing*) pada sambungan balok-kolom SRPMK berbasis digital dengan tingkat kedalaman model *LOD* 300, guna memastikan seluruh parameter pengekangan dan daktilitas memenuhi persyaratan ketat SNI 2847:2019.

1.5. Manfaat

Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan kontribusi yang signifikan, baik dalam pengembangan kompetensi personal, penguatan literatur akademis, maupun implementasi praktis di industri konstruksi. Secara personal, pelaksanaan studi ini menjadi instrumen strategis bagi penulis untuk menguasai ekosistem *Building Information Modeling* (*BIM*), khususnya melalui integrasi parametrik antara *Autodesk Revit* dan *Robot Structural Analysis Professional* (*RSAP*) dalam memvalidasi kriteria daktilitas SRPMK di wilayah dengan risiko seismik ekstrem. Secara akademis, hasil penelitian ini diposisikan sebagai referensi ilmiah bagi Program Studi Teknik Sipil Universitas Wijaya Kusuma Surabaya mengenai aplikasi *Interoperability* dalam mitigasi bencana melalui perencanaan digital yang akurat, serta menjadi landasan bagi peneliti selanjutnya dalam mengeksplorasi potensi pemodelan *Level of Development* (*LOD*) 300. Lebih lanjut, bagi praktisi dan industri konstruksi, penelitian ini menawarkan model alur kerja (*workflow*) yang lebih sistematis dan efisien guna meminimalisir risiko kegagalan desain yang bersifat fatal pada bangunan tinggi (*high-rise building*) di Kota Padang. Dengan mengintegrasikan validasi parameter keamanan seperti *inter-story drift* dan *Strong Column-Weak Beam* secara *real-time*, penelitian ini membuktikan peran vital transformasi digital Konstruksi 4.0 dalam menjamin integritas struktural, akurasi koordinasi data, dan keselamatan publik di masa depan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep & Evolusi *Building Information Modeling (BIM)*

Building Information Modeling (BIM) muncul pada akhir 1990-an sebagai evolusi langsung dari CAD 3D, dengan tujuan mengubah model geometrik menjadi basis data konstruksi terpadu (Li, Li, & Ding, 2024). *BIM* tidak hanya menghasilkan gambar 3D statis, tetapi *BIM* memungkinkan setiap properti—seperti tinggi lantai, dimensi kolom, luas tulangan, maupun parameter kinerja struktur—didefinisikan sebagai *Family Parameter* dalam Revit. Melalui *Dynamo* atau *Revit Python Shell*, skrip singkat, misalnya *loop* untuk *batch-Update* parameter tinggi efektif “*d*” dan luas tulangan “*As*” pada seluruh elemen SRPMK dapat mengotomasi revisi desain, sehingga perubahan satu nilai parameter langsung merambat ke model, lembar kuantitas, dan jadwal material tanpa intervensi manual (Zou, Feng, & Gao, 2023; Martínez, Pérez, & García, 2023).

Lebih jauh, penelitian Oktavianus, Siregar, dan Widodo (2024) membuktikan bahwa automasi parameter struktural di *BIM* mengurangi siklus revisi desain hingga 70 % dibanding alur CAD 2D konvensional, dengan waktu revisi rata-rata menurun dari 8 jam menjadi 2,5 jam per iterasi. *BIM* juga mendukung integrasi data eksternal melalui IFC, misalnya memanfaatkan skrip Python untuk mengekstrak properti *fy* dan *d* dari model Revit, menghitung kapasitas momen nominal M_n secara otomatis, lalu menyajikannya dalam basis data analisis menggunakan program struktur RSAP atau ETABS (Li, Li, & Ding, 2024; Yan, Liu, & Smith, 2024). Dengan demikian, evolusi *BIM* saat ini didorong oleh kebutuhan otomatisasi perhitungan teknik, kolaborasi real-time, dan kemampuan skrip fleksibel yang secara signifikan mengurangi *human error* dan duplikasi *file* dalam perencanaan struktur gedung menggunakan SRPMK.

2.2. Konsep *Level of Development (LOD)* dalam Pemodelan Struktural

2.2.1. *Level of Development 100 (LOD 100 - Conceptual Design)*

Pada tahapan paling awal ini, elemen bangunan direpresentasikan secara skematik berupa massa 3D mentah (*conceptual massing*), diagram blok ruang, atau simbol grafis dasar tanpa memiliki dimensi fisik penampang yang pasti (AIA, 2022). Elemen struktur pada tahap ini belum didefinisikan sebagai balok atau kolom individual, melainkan berupa amplop

spasial (spatial envelope) global yang menandai batas zona struktural. Atribut informasi LOD 100 pada komponen pemikul beban lateral dan gravitasi mencakup parameter teknis sebagai berikut:

1. Parameter Makro Spasial dan Geometris Dasar: Menyimpan data luasan lantai bruto (Gross Floor Area / GFA), estimasi volume bangunan total, tinggi total gedung dari elevasi dasar tanah (base), orientasi arah ortogonal utama, serta parameter fungsionalitas zonasi (BIM Forum, 2023).
2. Karakteristik Finansial dan Tekno-Ekonomi Awal: Memuat estimasi biaya konstruksi per meter persegi ($\$/m^2$) berdasarkan data historis tipologi bangunan komparatif guna keperluan studi kelayakan (feasibility study) (Wijaya & Pratama, 2022).
3. Kriteria Beban Global dan Parameter Seismik Makro: Memasukkan parameter *Input* makro berupa lokasi geografis proyek (Kota Padang) guna menetapkan zonasi percepatan puncak tanah dasar (Peak Ground Acceleration / PGA) berdasarkan peta gempa nasional, Kategori Risiko Bangunan (Kategori Risiko II untuk hunian apartemen), Faktor Keutamaan Gempa, serta estimasi awal gaya geser dasar (base shear global) menggunakan metode analisis gaya lateral ekuivalen makro sebelum model analisis elemen hingga dibuat (Rahman & Khatulistiani, 2024).

2.2.2. Level of Development 200 (LOD 200 - Schematic Design)

Elemen model struktural pada tahap ini mulai dipecah menjadi komponen individual atau rakitan sistem umum dengan ukuran, bentuk, dan lokasi penempatan yang masih bersifat perkiraan (approximate geometry) (BIM Forum, 2023). Komponen struktur dimodelkan sebagai elemen solid 3D tunggal (seperti famili dasar Structural Framing dan Structural Columns pada Revit) yang diletakkan pada sistem koordinat dan grid dasar arsitektur. Atribut informasi LOD 200 pada komponen struktur mencakup parameter teknis sebagai berikut:

1. Geometri Perkiraan (Preliminary Structural Design): Meng*Input* dimensi luar awal elemen berdasarkan rumus empiris pendekatan rasio bentang mekanika kuadratis (misalnya tinggi balok induk $h = 1/12 \times L$, lebar balok $b = 1/2 \times h$, dan dimensi kolom berdasarkan estimasi luas tributari beban gravitasi total $\sum P_u$), guna memfasilitasi koordinasi ruang bebas langit-langit (ceiling clearance) serta tinggi antar-lantai (floor-to-floor) lintas disiplin (Zhang & Lu, 2022).
2. Karakteristik Material dan Sifat Fisik Umum: Menyematkan parameter tipe material dasar yang diaplikasikan, seperti beton normal (cast-in-place concrete), beton pracetak

(precast), atau baja struktural, tanpa adanya pendefinisian kelas mutu kekuatan mekanis bahan secara spesifik (Martínez dkk., 2023).

3. Audit Tata Letak Global (*Spatial Clash Detection*): Berfungsi sebagai basis deteksi benturan makro antar-ruang untuk memeriksa aspek keterbangunan awal (*constructability review*), seperti mendeteksi apakah penempatan komponen vertikal (kolom utama dan dinding geser pada core gedung) memotong jalur sirkulasi arsitektural utama, koridor, atau elemen bukaan fasad (Johnson & Tan, 2022).

2.2.3. Level of Development 300 (LOD 300 - Detailed Design)

Pada tingkat LOD 300, elemen model telah dirancang secara spesifik, definitif, dan akurat dari segi kuantitas, ukuran penampang fisik, bidang acuan grid koordinat, serta orientasi geometris (*precise geometry*) (*BIM Forum*, 2023). Setiap komponen balok, kolom, dan dinding geser dalam model Revit bukan lagi sekadar perkiraan elemen spasial, melainkan representasi dari draf desain teknis yang telah lolos tahapan simulasi beban lateral elastis (seperti analisis spektrum respons ragam menggunakan program ETABS atau RSAP) sesuai regulasi SNI 1726:2019 (Ansor & Widodo, 2024). Atribut informasi LOD 300 pada komponen bangunan detail mencakup parameter teknis sebagai berikut:

1. Geometri Presisi Komparatif Berbasis Kode: Memasukkan parameter dimensi penampang luar yang kaku dan akurat, seperti parameter lebar balok, tinggi total balok, serta ukuran dimensi penampang kolom, yang telah divalidasi tidak mengalami under-design terhadap gaya dalam (M_u , V_u , P_u) hasil analisis struktur (Oktavianus dkk., 2024).
2. Spesifikasi Mekanis Desain Material: Menyimpan data properti mekanis bahan yang definitif, meliputi batas kuat tekan beton yang disyaratkan ($f'_c = 35$ MPa), modulus elastisitas beton (E_c), angka poisson (poisson's ratio), dan berat jenis material untuk kalkulasi berat seismik efektif struktur (W) (Rahayu & Santoso, 2023).
3. Dokumentasi Rencana Teknis dan Estimasi Volume (*Quantity Takeoff*): Atribut LOD 300 memungkinkan ekstraksi lembar kuantitas volume beton bruto (*concrete volume takeoff schedule*) secara otomatis per lantai bangunan, serta men-generate dokumen gambar rencana teknik (*engineering drawings*) berupa denah pembalokan (*structural Framing plans*) yang siap digunakan untuk pengurusan perizinan Persetujuan Bangunan Gedung (PBG) (Li dkk., 2024).

2.2.4. Level of Development 350 (LOD 350 - Construction Documentation)

LOD 350 merupakan tahapan integrasi kritikal yang menjembatani model desain detail (LOD 300) dengan dokumen pelaksanaan konstruksi riil di lapangan (shop drawings) melalui parameterisasi antarmuka (interface) dan hubungan interaktif antar-elemen struktural maupun lintas disiplin (*BIM Forum*, 2023). Karakteristik utama LOD 350 adalah kewajiban visualisasi dan pendataan konkret mengenai bagaimana komponen-komponen struktural yang saling bersinggungan bertemu secara fisik pada Hubungan Balok-Kolom (HBK) pada bangunan daktil penuh (SRPMK) (Putra & Ramadhani, 2024). Atribut informasi LOD 350 pada komponen bangunan tahan gempa mencakup parameter teknis sebagai berikut:

1. Spasial Sambungan Fisik dan Elemen Penunjang (*Connection Detailing*): Memodelkan ruang bebas penempatan kelompok tulangan (clearance), panjang penyaluran ankur (anchorage), lokasi pemutusan bentang balok (curtailment zone), lokasi sambungan mekanis (coupler atau splice zone), pelat landasan (base plate), serta elemen sirip pengaku (stiffener) jika terdapat elemen komposit baja-beton (Kim & Lee, 2022).
2. Koordinasi Sistem Lintas-Disiplin Tingkat Lanjut (*Hard Clash Detection*): Berfungsi sebagai instrumen utama untuk mengeksekusi *Clash Detection* secara ketat menggunakan platform Navisworks atau Solibri guna mendeteksi dan mengeliminasi benturan fisik yang terjadi antara batas luar beton balok atau kolom struktur terhadap lintasan pipa utilitas utama (MEP), seperti pipa sprinkler, pipa sanitasi, ductwork AC, maupun jalur kabel naman (cable tray) (Yan dkk., 2024).
3. validasi Metode Kerja dan Pengendalian Deviasi Lapangan (*Constructability Review*): Menyediakan visualisasi sambungan penampang yang rumit untuk memastikan bahwa metode pengecoran beton, pemasangan bekisting, dan instalasi tulangan di lapangan dapat diimplementasikan tanpa kendala spasial, sehingga meminimalkan penerbitan Request for Information (RFI) serta menghindari pembongkaran beton akibat salah urutan kerja di lapangan (Zou dkk., 2023).

2.2.5. Level of Development 400 (LOD 400 - Fabrication & Assembly)

LOD 400 merupakan tingkat kedalaman pemodelan tertinggi yang mensyaratkan seluruh elemen struktur dimodelkan secara definitif lengkap dengan informasi spesifik yang siap digunakan untuk keperluan fabrikasi, pemotongan, pembengkokan, dan perakitan di lapangan (rebar detailing & shop drawings). Pada level ini, elemen beton bertulang tidak

lagi hanya berupa volume padat, melainkan sebuah visualisasi rakitan yang merepresentasikan kondisi riil di lapangan, di mana geometris tulangan longitudinal, tulangan transversal (sengkang), pembengkokan kait (hook), hingga jarak tumpang tindih lewatan (splicing) digambarkan secara nyata.

1

Dalam perencanaan bangunan tahan gempa berbasis Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), pendefinisian atribut non-geometrik (*Shared Parameters*) berkarakteristik LOD 400 wajib diintegrasikan secara kaku ke dalam family Revit guna mengeksekusi validasi otomatis terhadap persyaratan ketat daktilitas penuh SNI 2847:2019. Atribut informasi LOD 400 pada komponen SRPMK mencakup parameter teknis sebagai berikut:

1. Detailing Tulangan Longitudinal Balok dan Kolom: Memasukkan parameter diameter tulangan, jumlah baris penulangan, rasio tulangan minimal ($P \geq 0,008$), serta panjang penyaluran dan penjangkaran (Anchorage_Length) pada daerah hubungan balok-kolom yang disyaratkan tidak boleh kurang dari 12db.
2. Pengekangan Lateral (Sengkang/Stirrup) pada Zona Sendi Plastis: Mengontrol parameter jarak antar sengkang (Stirrup_Spacing) secara presisi di area kritis sepanjang L_o dari muka kolom (di mana $L_o \geq 1/6$ tinggi bersih, dimensi terbesar kolom, atau 450mm) dengan batas spasi maksimum tidak boleh melebihi $le 0,2b_w$ atau 75 mm guna mencegah tekuk prematur pada baja tulangan utama.
3. Spesifikasi Material Fabrikasi: Menyimpan data mekanis material yang valid, meliputi mutu beton karakteristik (f'_c) dan tegangan leleh baja tulangan (f_y), yang menjadi variabel kontrol utama dalam kalkulasi kapasitas penampang.
4. Zonasi Pelelehan Khusus: Mengatur parameter dimensi Reduced Beam Section untuk mengontrol letak geografis sendi plastis pada balok demi melindungi integritas kolom penopang.

Lebih jauh, integrasi data grafis pada level LOD 400 memegang peranan vital dalam melakukan audit interaktivitas model melalui kapabilitas automated scheduling atau ekstraksi dokumen Bar Bending Schedule (BBS). Keberadaan atribut non-geometrik pada tingkat kedalaman LOD 400 ini memungkinkan lembar kuantitas material diekstraksi secara otomatis dan instan langsung dari schedules Revit. Data yang dihasilkan pun memiliki tingkat presisi yang sangat tinggi, mencakup informasi diameter aktual, panjang

potong total, sudut pembengkokan kait (hook), hingga kalkulasi berat total kebutuhan tulangan baja. Dengan demikian, akurasi data teknis tersebut tidak hanya mempermudah manajemen logistik, melainkan juga berfungsi secara optimal untuk meminimalkan waste material pada saat fase fabrikasi di lapangan dilakukan.

2.3. Perbandingan Antara *BIM* dan CAD Konvensional

Pada lingkungan desain tradisional, CAD 2D masih mengandalkan gambar garis dan simbol untuk merepresentasikan elemen bangunan. Proses revisi pada CAD 2D bersifat manual, sehingga setiap perubahan dimensi atau detail memerlukan *Update* ulang pada banyak lembar gambar, rawan terjadi duplikasi *file* dan versi yang tidak sinkron (Oktavianus, Siregar, & Widodo, 2024). Kurangnya koneksi antar *Sheet* menyebabkan miskomunikasi antar-disiplin, misalnya perubahan denah arsitektur tidak otomatis terproyeksi pada gambar struktur atau MEP, yang berpotensi menimbulkan *clash* dan RFI (*Request for Information*) di lapangan (Johnson & Tan, 2022).

BIM menawarkan model 3D berisi geometri dan data non-geometrik yang terhubung lewat *database* terpadu. Setiap revisi parameter, seperti panjang balok, ketebalan pelat, atau materi tulangan dapat langsung merambat ke seluruh *view* dan *Sheet* terkait, menjaga konsistensi dokumen dan meminimalkan kesalahan *human error* (Li, Li, & Ding, 2024). Fitur *version control* dalam platform *BIM* (misal Revit Server, *BIM 360*) memungkinkan tim proyek di lapangan melacak perubahan secara *real time* dan melakukan *rollback* jika diperlukan (Martínez, Pérez, & García, 2023). Selain itu, visualisasi 3D dan kemampuan ekstraksi kuantitas otomatis meningkatkan koordinasi lintas-disiplin dan mempercepat estimasi material.

Beberapa penelitian membandingkan produktivitas revisi antara alur kerja berbasis *BIM* dan CAD 2D. Oktavianus, Siregar, dan Widodo (2024) menjelaskan bahwa pada proyek gedung perkantoran 10 lantai di Jakarta, penggunaan *BIM* menurunkan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan revisi desain hingga 65 % dibandingkan CAD 2D. Rahayu dan Santoso (2023) menemukan bahwa tingkat duplikasi gambar dan kesalahan penandaan (*tagging*) berkurang hingga 80 % ketika menggunakan *BIM*, yang berkontribusi pada penurunan biaya *change order* sebesar 1,2 % dari total nilai kontrak. Smith dan Lee (2023) menambahkan bahwa alur *BIM* mempersingkat waktu koordinasi lintas-disiplin, seperti

antara struktur dan MEP, sehingga percepatan finalisasi gambar kerja mencapai 50 % lebih cepat daripada CAD 2D konvensional.

2.4. Teori dan Konsep Struktur Gedung Daktail

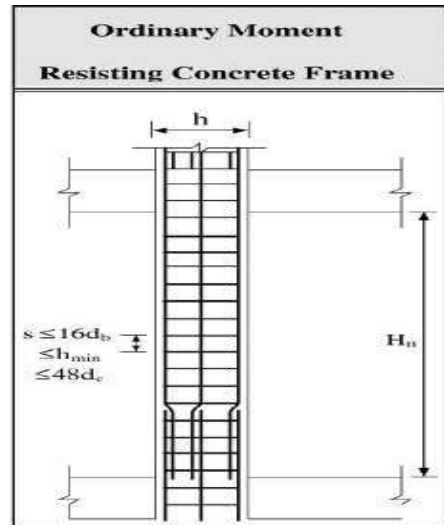
2.4.1. Filosofi Perencanaan Bangunan Tahan Gempa

Dalam perkembangan rekayasa struktur modern, filosofi utama perencanaan bangunan di wilayah rawan seismik tinggi difokuskan pada konsep berbasis kinerja (*performance-based design*). Perencanaan tidak lagi didasarkan pada prinsip mempertahankan seluruh struktur dalam kondisi elastis penuh, karena hal tersebut tidak efisien dari segi dimensi maupun ekonomi (Taranath, 2022). Standar mutakhir mengizinkan terjadinya kerusakan struktural yang terkontrol pada elemen non-kritikal demi mencegah keruntuhan global (*collapse prevention*) serta menjamin keselamatan jiwa penghuni gedung (Priestley dkk., 2023). Filosofi penyerapan energi ini direalisasikan dengan mereduksi beban gempa elastis menggunakan faktor modifikasi respons (R) sesuai regulasi SNI 1726:2019. Konsekuensi dari reduksi beban ini adalah struktur bangunan akan dipaksa memasuki fase inelastis saat dilanda gempa kuat. Oleh karena itu, sistem struktural wajib dibekali dengan kapasitas daktilitas yang tinggi agar mampu mendisipasi energi seismik melalui deformasi pasca-leleh tanpa mengalami kehilangan kekuatan secara drastis (Chen & Scawthorn, 2024).

2.4.2. Klasifikasi Daktilitas Menurut SNI 2847:2019 dan SNI 1726:2019

Berdasarkan kemampuan komponen dalam mendisipasi energi seismik serta pemenuhan detail penulangan pengekangnya, perilaku penulangan beton bertulang secara tegas dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama menurut SNI 2847:2019 (Persyaratan Beton Struktural) dan SNI 1726:2019 (Persyaratan Perancangan Seismik) (Moehle, 2023):

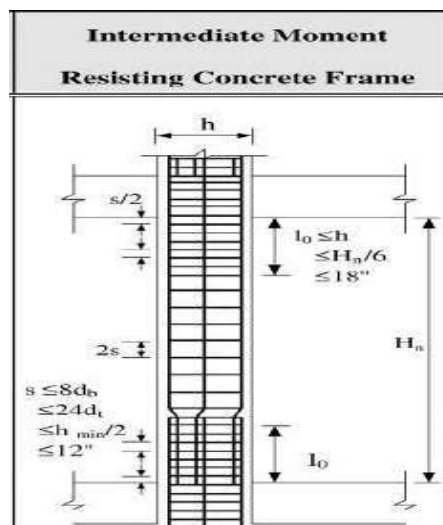
1. Daktilitas Rendah (Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa / SRPMB): Struktur dirancang dengan tingkat disipasi energi minimum karena mengasumsikan respons struktur dominan elastis. Sistem ini hanya diizinkan untuk wilayah dengan risiko seismik rendah (KDS A atau B) dan sangat rentan terhadap kegagalan geser seketika setelah melampaui batas elastisnya.



Gambar 2. 1 Detail penulangan kolom pada Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Berdasarkan Gambar 2.1, terlihat bahwa SRPMB menggunakan pengekanan tulangan transversal yang relatif renggang sehingga kemampuan kolom dalam menahan deformasi inelastis masih terbatas. Kondisi ini menyebabkan struktur memiliki kapasitas disipasi energi yang rendah dan lebih rentan mengalami keruntuhan getas ketika menerima beban gempa yang besar.

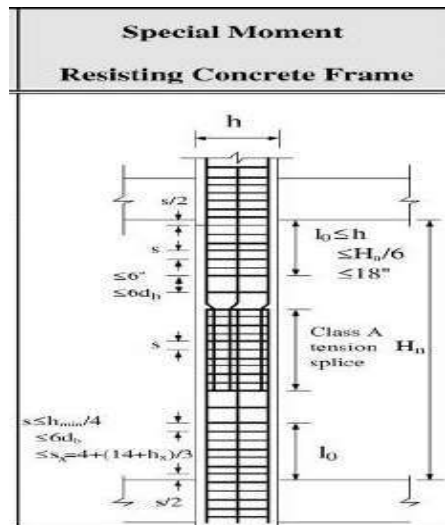
2. Daktilitas Menengah (Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah / SRPMM): Struktur memiliki kemampuan disipasi energi moderat untuk wilayah risiko seismik sedang (KDS C). Penempatan sengkang ikat dirancang cukup rapat pada zona-zona rawan regangan untuk membatasi kerusakan inelastis lokal.



Gambar 2. 2 Detail penulangan kolom pada Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Berdasarkan Gambar 2.2, dapat diamati bahwa daerah ujung kolom diberikan sengkang dengan jarak yang lebih rapat dibandingkan SRPMB. Pengekangan tersebut bertujuan meningkatkan kapasitas daktilitas kolom sehingga struktur mampu mengalami deformasi inelastis dalam batas yang masih aman serta memiliki kemampuan disipasi energi yang lebih baik.

3. Daktilitas Tinggi/Penuh (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus / SRPMK): Struktur memiliki kapasitas daktilitas tertinggi yang diwajibkan untuk wilayah risiko seismik tinggi (KDS D hingga F). Penyerapan energi gempa dilakukan secara optimal melalui pembentukan sendi plastis (*plastic hinge*) global secara bertahap pada lokasi yang direncanakan aman, serta didukung oleh pengekangan tulangan lateral yang sangat ketat untuk mencegah tekuk prematur pada tulangan longitudinal (Wight, 2022).



Gambar 2. 3 Detail penulangan kolom pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.3, SRPMK memiliki pengekangan tulangan transversal paling rapat pada daerah kritis kolom. Detail tersebut dirancang untuk meningkatkan kapasitas daktilitas, mempertahankan integritas inti beton, serta memungkinkan struktur mengalami deformasi inelastis yang besar tanpa kehilangan kekuatan secara signifikan selama menerima beban gempa berulang.

2.4.3. Mekanisme *Strong Column – Weak Beam*

Untuk menjamin terciptanya perilaku daktail penuh pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), struktur wajib memenuhi kriteria *Strong Column - Weak Beam* atau konsep "Kolom Kuat - Balok Lemah" (Fardis, 2024). Pendekatan ini mensyaratkan bahwa total kapasitas momen nominal lentur kolom harus lebih besar daripada kapasitas momen nominal lentur balok yang bertemu pada satu titik hubungan balok-kolom (HBK).

Mekanisme ini bertujuan memicu terbentuknya sendi plastis terlebih dahulu di ujung-ujung balok secara merata di setiap lantai bangunan ketika menerima beban lateral. Balok yang mengalami leleh lentur bertindak sebagai sekring (*fuse*) yang mendisipasi energi gempa, sementara elemen kolom dipertahankan tetap elastis agar dapat terus memikul beban gravitasi serta mencegah terjadinya mekanisme keruntuhan tingkat (*soft-story collapse*) yang fatal (Elnashai & Di Sarno, 2025). Sesuai pasal 18.7.3.2 SNI 2847:2019, kekuatan lentur kolom harus memenuhi ambang batas minimum berikut:

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb}$$

Dimana:

$\sum M_{nc}$ = Jumlah kekuatan lentur nominal kolom yang merangka ke HBK, dihitung pada muka hubungan tersebut.

$\sum M_{nb}$ = Jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke HBK, dihitung pada muka hubungan tersebut.

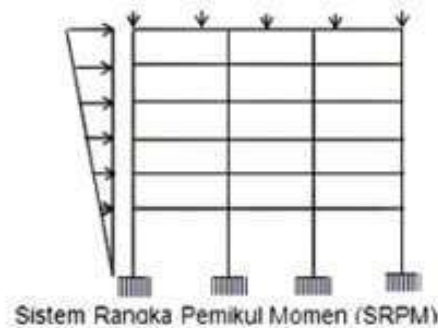
2.5. Sistem Penahan Gempa

Dalam perencanaan struktur gedung tahan gempa, pemilihan sistem pemikul gaya lateral yang tepat sangat krusial untuk menjamin kekakuan, kekuatan, dan daktilitas struktur. Berdasarkan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019, terdapat tiga sistem utama beton bertulang yang umum diimplementasikan pada gedung bertingkat, yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM), Sistem Dinding Geser (Shear Wall), dan Sistem Ganda (Dual System).

2.5.1. Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM)

Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM) merupakan konfigurasi struktur di mana elemen balok dan kolom dirangka secara kaku melalui hubungan balok-kolom (HBK) untuk memikul beban gravitasi sekaligus gaya lateral akibat gempa. Berdasarkan tingkat daktilitas dan kapasitas disipasi energi seismiknya, SRPM dibagi menjadi tiga kategori:

1. **Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)**: Memiliki tingkat daktilitas rendah dan didesain untuk merespons gempa murni secara elastis. Hanya diizinkan untuk wilayah dengan risiko kegempaan rendah atau Kategori Desain Seismik (KDS) A dan B.
2. **Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)**: Memiliki tingkat daktilitas moderat untuk wilayah risiko kegempaan sedang (KDS C), di mana penyerapan energi mengandalkan penulangan sengkang yang lebih rapat di area tumpuan ujung balok.
3. **Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)**: Memiliki kapasitas daktilitas penuh (tinggi) yang wajib diterapkan pada wilayah risiko kegempaan tinggi (KDS D hingga F). Sistem ini mengadopsi filosofi *Strong Column-Weak Beam* (kolom kuat, balok lemah) dan memerlukan *detailing* sengkang pengekan lateral yang sangat ketat (jarak maksimal 75 mm di zona sendi plastis).

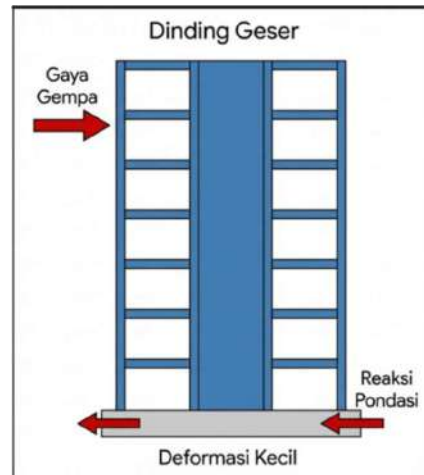


Gambar 2. 4 Sistem Struktur Beton Bertulang Penahan Gempa Bumi

2.5.2. Sistem Dinding Geser (*Shear Wall*)

Shear Wall atau dinding geser adalah elemen struktural vertikal berbentuk dinding beton bertulang masif yang didesain untuk memberikan resistensi geser dan kekakuan lateral yang sangat besar. Berbeda dengan SRPM yang menahan gaya melalui aksi lentur balok-kolom, dinding geser menahan beban lateral gempa melalui aksi konsol (*cantilever*), sehingga sangat efektif dalam membatasi simpangan antar-lantai (*inter-story drift*) pada gedung tinggi.

Untuk wilayah kegempaan tinggi, komponen ini wajib didesain sebagai **Dinding Geser Beton Bertulang Khusus** yang dilengkapi dengan elemen pembatas khusus (*boundary elements*) pada ujung-ujung dinding guna menahan konsentrasi tegangan aksial dan lentur yang besar agar tidak terjadi tekuk prematur.



Gambar 2. 5 Sistem Struktur Beton Bertulang Penahan Gempa Bumi

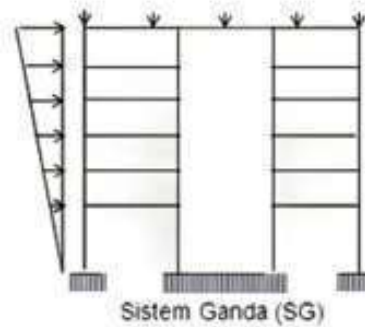
2.5.3. Sistem Ganda (*Dual System*)

Sistem Ganda (*Dual System*) merupakan kombinasi struktural terintegrasi yang menggabungkan keunggulan daktilitas dari SRPMK dengan kekakuan lateral masif dari Dinding Geser Beton Bertulang Khusus. Pada lantai-lantai bawah yang menerima gaya geser dasar (base shear) terbesar, dinding geser akan memikul beban dominan, sedangkan SRPMK akan mengambil alih peran penahan simpangan pada lantai-lantai atas saat efektivitas dinding geser mulai berkurang akibat deformasi lentur.

Berdasarkan ketentuan Pasal 7.2.5.1 SNI 1726:2019, suatu struktur dapat diklasifikasikan sebagai Sistem Ganda apabila memenuhi persyaratan teknis berikut:

1. Rangka ruang bertingkat yang lengkap harus menyediakan dukungan penuh untuk memikul beban gravitasi.
2. Beban lateral gempa dipikul bersama secara interaktif oleh dinding geser dan rangka pemikul momen sesuai dengan proporsi kekakuannya.
3. Rangka pemikul momen secara mandiri (tanpa bantuan dinding geser) wajib didesain mampu memikul minimal 25% dari total gaya lateral desain seluruh gedung.

4. Rangka pemikul momen tersebut harus diklasifikasikan sebagai Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Khusus (SRPMK).



Gambar 2. 6 Sistem Struktur Beton Bertulang Penahan Gempa Bumi

2.6. Teori dan Pemodelan SRPMK dalam *BIM*

Dalam *BIM*, setiap elemen SRPMK, yaitu kolom maupun balok diberi *shared parameter* khusus yang mencerminkan kapasitas struktural dan detail daktilitas. Misalnya, parameter '*Column MomentCapacity*' pada famili kolom menyimpan nilai momen lentur nominal total kolom (ΣM_{nc}), sedangkan '*Beam.MomentCapacity*' pada famili balok menyimpan nilai momen lentur nominal total balok (ΣM_{nb}) (Rahman & Khatulistiani, 2024). Dengan cara ini, hubungan fundamental SRPMK $\Sigma M_{nc} \geq 1,2 \Sigma M_{nb}$ dapat diperiksa secara otomatis oleh skrip *Dynamo* atau *Python* yang mengeksekusi *rule-based check* terhadap kedua parameter tersebut.

Detailing sambungan plastis juga diatur lewat parameter famili '*RBS_Depth*' menentukan kedalaman *area reduced beam section* yaitu “zona lemah” yang sengaja didesain di balok agar plastifikasi terfokus di situ, dan '*Stirrup_Spacing*' mengontrol jarak sengkang maksimum (≤ 75 mm) di sekitar *plastic hinge* (Putra & Ramadhani, 2024). Setelah semua parameter terisi, model diperiksa menggunakan *tool* seperti *Solibri Model Checker* atau *plugin in-house* untuk memastikan setiap balok dan kolom memenuhi kriteria daktilitas penuh, yaitu jarak anchorage $\geq 12 d_b$ dan rasio tulangan longitudinal $\geq 0,008$ (Salsabila, 2023).

Lebih jauh, integrasi *BIM-to-analysis* memungkinkan skrip otomatis mengeksport nilai d , A_s , dan f_y dari *schedules* Revit ke RSAP atau ETABS melalui format IFC/DXF. Di sana, *Software* menghitung kapasitas momen $M_n = A_s f_y (d - a/2)$ dan kapasitas geser $V_n = V_c + V_s$ secara linier, lalu mengimpor kembali hasil *plastic hinge locations* ke dalam Revit untuk visualisasi (Wicaksono & Hartono, 2025). Dengan alur kerja ini, seluruh proses validasi

SRPMK mulai dari perhitungan momen, pengecekan rule $\Sigma M_{nc} \geq 1,2 \Sigma M_{nb}$, hingga detailing RBS dan sengkang ~~stirrup~~—dijalankan secara terintegrasi, meminimalkan revisi manual dan memastikan kepatuhan terhadap standar tahan gempa.

Untuk mengendalikan lokasi terbentuknya sendi plastis, perancangan SRPMK menetapkan:

- Balok: titik leleh di kedua ujung bentang, masing-masing pada jarak $2 \times h$ (h = tinggi penampang) dari muka kolom.
- Kolom: sendi plastis di kedua ujung, dengan jarak L_o dari muka sambungan minimal memenuhi:

$$L_o \geq 1/6 \text{ tinggi bersih kolom}$$

$$L_o \geq \text{dimensi terbesar penampang kolom}$$

$$L_o \geq 450 \text{ mm}$$

Dengan pengaturan seperti tersebut di atas, sendi plastis selalu terjadi pada elemen yang “dikorbankan” (balok), dan menjaga kolom dalam zona elastis dan meningkatkan disipasi energi keseluruhan (Salsabila, 2023).

2.7. Sistem Rangka Untuk Perencanaan Struktur Gedung

Dalam menanggulangi beban lateral gempa, tiga sistem struktur utama—yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), *braced frame*, dan *shear wall*—menawarkan mekanisme disipasi energi dan kontrol deformasi yang berbeda. *Braced frame* merupakan sistem yang mengandalkan elemen diagonal untuk menahan gaya tarik dan tekan melalui aksi rangka batang. Sistem ini menampilkan kekakuan awal (*initial stiffness*) yang tinggi dan *drift* yang terkendali, namun plastifikasi cenderung terfokus pada sambungan *bracing* dengan kapasitas disipasi energi yang terbatas, sehingga daktilitas sistem ini umumnya lebih rendah dibanding SRPMK (Santoso & Chen, 2023). Secara teknis, sistem *braced frame* merupakan solusi yang paling umum dan efektif diterapkan pada perencanaan struktur baja (structural steel) untuk memberikan stabilitas lateral yang signifikan dengan penambahan berat struktur yang relatif minimal (Prabowo & Setiawan, 2021).

Shear wall (dinding geser), di sisi lain, memberikan resistensi geser yang sangat besar dan mendistribusikan gaya gempa secara merata ke fondasi. Dalam perencanaan gedung beton bertulang, *shear wall* berfungsi sebagai elemen pengaku utama yang umumnya ditempatkan pada area core (inti gedung) atau dinding pembatas untuk mereduksi simpangan lateral secara drastis. Mekanisme kerjanya mengandalkan kekakuan penampang yang besar

untuk menyerap gaya geser dasar, namun sistem ini memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas tata ruang arsitektural. Selain itu, jika tidak dilengkapi dengan elemen pembatas khusus (boundary elements) yang memadai sesuai standar terbaru, energi gempa akan lebih banyak dilepaskan melalui mekanisme geser yang cenderung getas dibandingkan mekanisme lentur plastis (Wicaksono & Hartono, 2025).

SRPMK memadukan kekakuan dan kekuatan yang memadai dengan daktilitas tinggi melalui prinsip “*strong column–weak beam*,” di mana kolom tetap elastis sementara balok dirancang sebagai lokasi terbentuknya sendi plastis. Penelitian Wicaksono dan Hartono (2025) pada proyek hunian vertikal di Padang menunjukkan bahwa, dibanding *dual system* atau *shear wall* murni, SRPMK mampu menahan *inter-story drift* di bawah 1 % *story height* tanpa kerusakan signifikan. Selain itu, analisis *nonlinear pushover* oleh Putra dan Ramadhani (2024) mengungkap *energy dissipation ratio* lebih dari 20 % per siklus dan *ductility factor* hingga 4,5, jauh melampaui rentang minimum untuk “*full ductility*.”

Meskipun *braced frame* unggul dalam kekakuan awal dan *shear wall* dalam kekuatan geser, SRPMK menawarkan keseimbangan optimal antara kekakuan memadai, daktilitas tinggi, dan efisiensi material. Dengan detail *reduced beam section*, jarak sengkang yang rapat (≤ 75 mm), serta *anchorage* panjang ≥ 12 db, SRPMK tidak hanya mengurangi risiko keruntuhan secara mendadak tetapi juga menurunkan volume beton dan tulangan berlebih hingga 5 % (Rahman & Khatulistiani, 2024). Oleh karena itu, untuk konteks hunian vertikal di zona gempa seperti Kota Padang, SRPMK merupakan pilihan paling efisien dan aman dibandingkan sistem *braced frame* maupun *shear wall*.

2.8. Perencanaan Tahan Gempa Menggunakan BIM

Dalam perencanaan struktur tahan gempa di Indonesia, SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019 menjadi acuan mutlak. SNI 1726:2019 menjabarkan prosedur analisis respons gempa berbasis spektrum elastik, mulai dari penetapan koefisien zona gempa (Z), faktor impor (I), hingga klasifikasi site class (S) yang bersama-sama menentukan spektrum percepatan desain S_{dT} dan koefisien respons C_s , hingga pada akhirnya menghasilkan gaya geser dasar V_b untuk analisis beban lateral. SNI 2847:2019 mengatur perencanaan beton bertulang, mencakup perhitungan kapasitas momen nominal M_n berdasarkan parameter geometri dan material seperti jarak efektif d , luas tulangan tarik A_s , dan tegangan leleh f_y serta persyaratan detailing sengkang dan *anchorage* untuk memastikan daktilitas sesuai rasio

minimal tulangan longitudinal ($\rho \geq 0,008$) dan *spacing* maksimum sengkang ($\leq 0,2 b_w$ atau 75 mm) -

Dengan memanfaatkan kapabilitas *BIM*, semua ketentuan ini dapat diotomasi sehingga proses perencanaan menjadi jauh lebih efisien dan akurat. Pertama, variabel global seperti *Z*, *I*, dan *S* cukup di *Input* sekali sebagai *Shared Parameters* dalam model Revit, lalu skrip *Dynamo* atau *Python* secara otomatis menghitung spektrum respons, C_s , dan V_b setiap kali klasifikasi situs atau parameter beban berubah. Kedua, *family* kolom dan balok diperkaya dengan parameter teknis termasuk nilai d , A_s , dan f_y yang menjadi dasar bagi skrip untuk menghitung M_n dan memeriksa ketepatan terhadap rasio daktilitas serta detailing sengkang dan *anchorage* sesuai SNI 2847. Terakhir, *tool checker* seperti Solibri API atau *add-in* khusus membaca *schedules* Revit untuk melaporkan elemen yang belum memenuhi syarat, misalnya jarak sengkang yang melebihi batas atau *anchorage* yang kurang dari $12 d_b$, serta memverifikasi bahwa simpangan antar lantai tidak melampaui $0,02 \times \text{story height}$ (Rahayu & Santoso, 2023; Yan, Liu, & Smith, 2024). Melalui integrasi standar SNI dengan otomasi *BIM*, perencanaan SRPMK untuk Apartemen Az-Zahr tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga meminimalkan revisi manual dan potensi kesalahan, sehingga alur kerja menjadi lebih andal dan cepat.

2.9. Resiko Gempa Tinggi

Kota Padang, yang termasuk Zona III menurut SNI 1726:2019 dengan koefisien $Z=0.30$, menghadapi risiko gempa sedang hingga tinggi akibat sesar Sumatera aktif di lepas pantai Barat Sumatera (BMKG, 2021). Kombinasi percepatan puncak desain (PGA) yang dapat mencapai 0,25 g dan kondisi *site class* C–D memaksa perencanaan struktur menitikberatkan pada ketahanan dan deformasi terkendali. Risiko utama meliputi kerusakan struktural akibat simpangan antar lantai berlebihan, kehilangan kapasitas dukung elemen, dan kegagalan sendi plastis di lokasi tak terduga (Rahman & Khatulistiani, 2024).

BIM memainkan peran penting dalam mengurangi ketidakpastian geoteknik dan seismik dengan mengintegrasikan data pemetaan geologi dan peta zona gempa langsung ke dalam model 3D. Dengan memasukkan variabel *site class* sebagai *shared parameter* ditandai di setiap grid fondasi skrip *Dynamo* dapat men-generate otomatis distribusi spektrum respons berdasarkan *Input* kondisi tanah lokal. Misalnya, sebuah studi oleh Ahmed, Khan, dan Zhang (2024) menunjukkan bahwa integrasi data geoteknik dalam *environment BIM*

mempersingkat waktu analisis situs hingga 50 % dan meningkatkan akurasi penentuan *drift allowance*.

Selain itu, visualisasi 3D *hazard mapping* di dalam Revit atau Navisworks memudahkan tim desain untuk menempatkan elemen tahan gempa, seperti kolom dengan kapasitas lentur lebih besar dan detailing sengkang lebih rapat, pada area dengan risiko tertinggi. Rahayu dan Santoso (2023) melaporkan bahwa validasi *early-warning zone* melalui *BIM GIS linkage* memungkinkan penyesuaian parameter beban gempa secara *real time*, sehingga potensi *under-design* dapat diminimalkan. Akhirnya, simulasi animasi skenario gempa di *BIM* menggunakan *plugin* seperti M-ASTRUCt akan memberi *insight visual* tentang pola plastifikasi dan *interstory drift* sebelum pembangunan, memfasilitasi diskusi tim multidisiplin dan pengambilan keputusan mitigasi yang lebih baik.

Dengan demikian, risiko gempa tinggi di Padang tidak hanya dipahami melalui angka-angka spektrum dan peta zona, tetapi juga di-*manage* secara proaktif dalam model *BIM* yang kaya data (BMKG, 2021; Ahmed, Khan, & Zhang, 2024; Rahayu & Santoso, 2023), memastikan struktur SRPMK Apartemen Az-Zahr didesain dengan pertimbangan geoteknik dan seismik yang komprehensif.

2.10. Klasifikasi Situs

Pada bagian klasifikasi situs ini, diuraikan prosedur sistematis untuk menentukan kategori situs yang nantinya akan menetapkan kriteria desain seismik melalui faktor-faktor amplifikasi struktur. Penentuan klasifikasi tersebut didasarkan pada karakteristik lapisan tanah hingga kedalaman 30 meter di bawah permukaan tanah sesuai dengan ketentuan Pasal 5.3 SNI 1726:2019. Proses evaluasi dimulai dengan melakukan pengecekan terhadap kriteria kelas situs SF atau tanah khusus, di mana investigasi geoteknik spesifik diperlukan jika ditemukan indikasi tanah yang rawan likuifaksi, lempung sangat organik, atau lapisan lempung lunak yang sangat tebal. Jika kriteria untuk kelas SF tidak terpenuhi, langkah selanjutnya adalah memeriksa apakah profil tanah masuk ke dalam klasifikasi situs SE atau tanah lunak melalui pengujian nilai indeks plastisitas, kadar air, serta kuat geser niralir pada lapisan tertentu.

Apabila situs tidak tergolong ke dalam kelas SF maupun SE, maka dilakukan perhitungan parameter rata-rata yang meliputi kecepatan gelombang geser rata-rata tahanan penetrasi standar rata-rata, dan kuat geser niralir rata-rata dari profil tanah setebal 30 meter

tersebut. Setelah nilai parameter rata-rata diperoleh, hasil perhitungan tersebut kemudian dibandingkan secara langsung dengan kriteria yang tercantum dalam Tabel 2.1. Melalui perbandingan ini, kategori situs dapat ditetapkan secara definitif mulai dari kelas SA untuk batuan keras, SB untuk batuan, SC untuk tanah keras, sangat padat dan batuan lunak, hingga SD untuk tanah sedang, guna menentukan respon spektrum desain yang tepat bagi struktur bangunan.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	V_s (m / detik)	N atau N_{ch}	S_u (kPa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralar $S_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang mengandung lebih dari 3m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : – Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah – Lempung sangat organic dan / atau gambut (ketebalan $H > 3m$) – Lempung berplastisitas tsangat tinggi (ketebalan $H > 7,5m$ dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak / setengah teguh dengan ketebalan $H > 35m$ dengan $S_u < 50$ kPa		

CATATAN : N/A = tidak dapat dipakai

(Sumber: SNI 1726-2019, Pasal 5.3)

2.11. Menentukan Respon Spektra

Dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.2 dijelaskan bahwa untuk menghitung respons spektra percepatan gempa MCER di permukaan tanah, perlu diterapkan faktor amplifikasi seismik pada dua periode: 0,2 detik dan 1 detik. Faktor amplifikasi tersebut mencakup F_a , yang mengoreksi percepatan pada periode pendek, dan F_v , yang mengoreksi percepatan pada periode 1 detik. Nilai respons spektra percepatan pada periode pendek (SMS) dan periode 1 detik (SM1)—setelah disesuaikan dengan klasifikasi situs—dihitung menggunakan rumus berikut:

$$SMS = F_a \times S_s \dots \dots \dots (2.1)$$

$$SM1 = F_v \times S1 \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

S_s = Parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode pendek, 0,2 detik.

$S1$ = Parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode 1 detik.

Dengan koefisien situs F_a dan F_v mengikuti Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Koefisien Situs (F_a)

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Catatan:

SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs spesifik, lihat pasal 6.10.1

Sumber: SNI 1726-2019, pasal 6.2

Tabel 2. 3 Koefisien situs (F_v)

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726-2019, pasal 6.2

Catatan:

SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs spesifik, lihat pasal 6.10.1.

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek, SDS dan pada periode 1 detik, $SD1$, harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$SDS = \frac{2}{3} S_{ms} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$SD1 = \frac{2}{3} S_{m1} \dots\dots\dots(2.4)$$

Berdasarkan SNI 1726-2019 pasal 6.4, bila spektrum respon desain diperlukan oleh tata cara ini dan prosedur gerak tanah dari spesifik-situs tidak digunakan, maka kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dengan mengacu pada Gambar 2.1 spektrum respons desain, dan mengikuti ketentuan di bawah ini:

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari persamaan;

$$a. S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots(2,5)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan S_{DS} ,

3. Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$a. S_a = \frac{SD}{T} \dots\dots\dots(2,6)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \dots \dots \dots (2,7)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek;

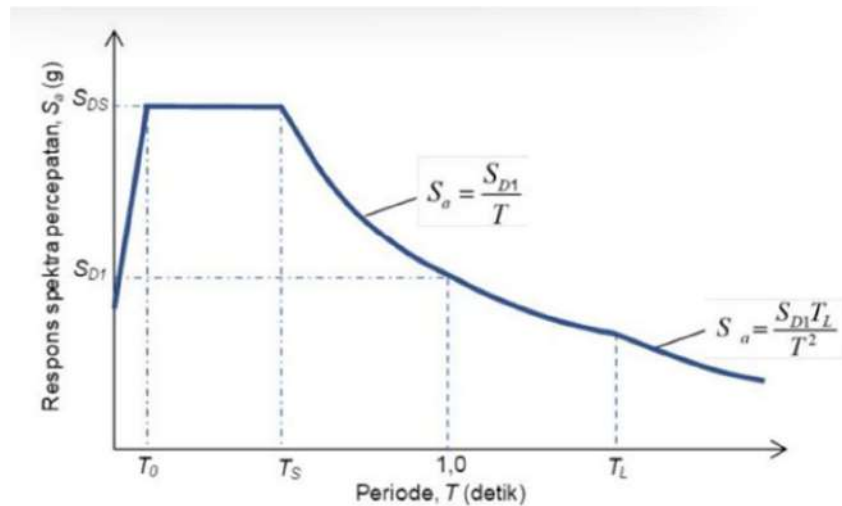
S_{D1} = parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik;

T = Periode getas fundamental struktur.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots \dots \dots (2,8)$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots \dots \dots (2,9)$$

T_L = peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada Gambar 2.7



Gambar 2. 7 Spektrum Respon Desain

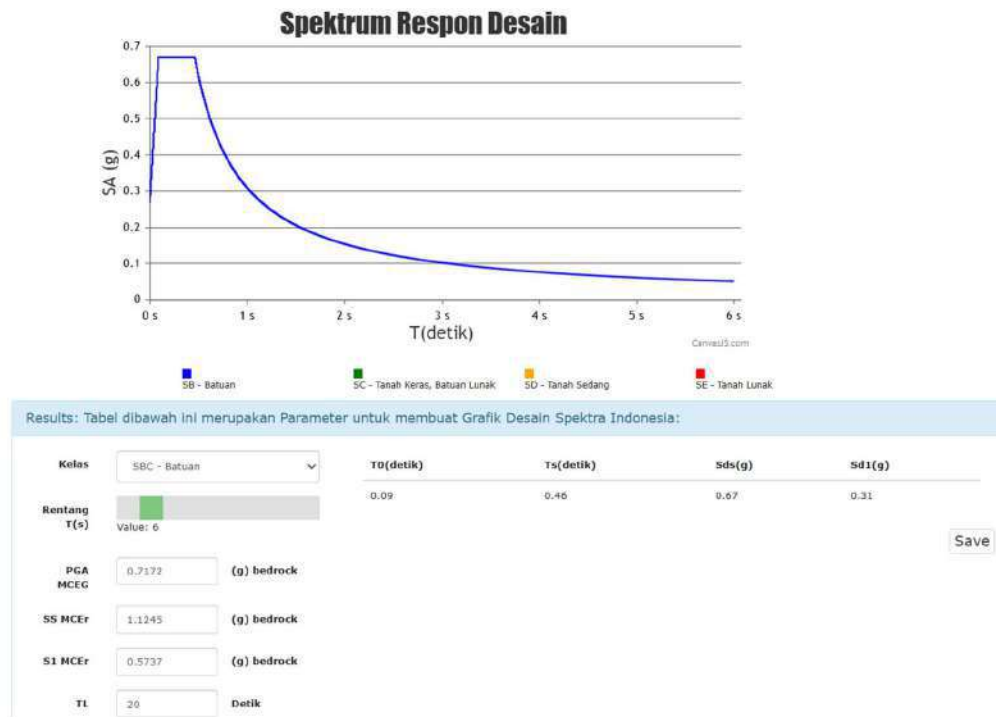
Secara fisik, keberadaan dua perumusan respons spektral percepatan desain (S_a) setelah melewati batas periode T_s didasarkan pada interval nilai periode getas fundamental struktur (T) terhadap nilai periode transisi panjang (T_L) dengan penjelasan sebagai berikut:

- Wilayah Respons Spektra Menengah ($T_s < T \leq T_L$) Pada interval ini, kurva dikembangkan menggunakan Persamaan (2.6), yaitu $S_a = \frac{S_{D1}}{T}$. Wilayah ini merepresentasikan Zona Kecepatan Konstan (*Constant Velocity Domain*). Nilai

percepatan gempa desain (S_a) meluruh secara linier (berbanding terbalik) dengan bertambahnya nilai periode getar struktur (T). Karakteristik ini umumnya berlaku pada struktur gedung tingkat rendah hingga menengah.

- Wilayah Respons Spektra Sangat Panjang ($T > T_L$) Apabila periode alami bangunan sangat panjang hingga melampaui batas T_L , perumusan kurva beralih menggunakan Persamaan (2.7), yaitu $S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2}$. Wilayah ini merupakan Zona Perpindahan Konstan (*Constant Displacement Domain*). Pada bangunan yang sangat fleksibel (seperti gedung pencakar langit atau jembatan bentang panjang), nilai S_a meluruh jauh lebih cepat karena berbanding terbalik dengan kuadrat dari periode strukturnya (T^2). Penerapan batas transisi menggunakan fungsi pengali T_L ini bertujuan untuk mengontrol agar grafik tidak menghasilkan nilai percepatan yang terlalu rendah secara ekstrem (*under-estimate*) demi menjaga faktor keamanan struktur.

Kurva spektrum respons desain diperoleh secara cepat dan praktis melalui situs [http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/] Kurva ini memvisualisasikan hubungan antara



percepatan respons spektrum (S) dan periode getar (T). Contoh grafik spektrum respons untuk wilayah Kota Padang, situs tanah ditampilkan pada Gambar 2.8

Gambar 2. 8 Grafik Respon Spektra Lokasi Kota Padang

2.12. Menentukan Kategori Desain Seismik

Penetapan Kategori Desain Seismik (KDS) bagi setiap struktur wajib dilakukan dengan mengikuti ketentuan teknis yang berlaku dalam pasal ini. Untuk bangunan yang termasuk dalam kategori risiko I, II, atau III dan terletak di wilayah dengan nilai parameter respons spektral percepatan terpetakan periode 1 detik (S_1) mencapai atau melebihi 0,75, maka struktur tersebut secara otomatis harus ditetapkan sebagai KDS E. Sementara itu, jika bangunan memiliki kategori risiko IV dengan nilai S yang sama, yaitu lebih besar atau sama dengan 0,75, maka klasifikasinya harus ditetapkan ke dalam KDS F.

Bagi seluruh struktur di luar kriteria tersebut, penentuan KDS dilakukan secara komprehensif berdasarkan interaksi antara kategori risiko bangunan serta parameter respons spektral percepatan desain SDS dan SD_1 . Dalam proses ini, setiap bangunan dan struktur harus dimasukkan ke dalam kategori desain seismik yang paling parah atau konservatif dengan mengacu pada Tabel 8 dan Tabel 9, terlepas dari berapa pun nilai periode fundamental getaran strukturnya T . Namun, apabila nilai S_1 lebih kecil dari 0,75, terdapat pengecualian di mana kategori desain seismik diizinkan untuk ditentukan hanya berdasarkan Tabel 8 saja.

Fleksibilitas penggunaan Tabel 8 tersebut dapat diterapkan apabila seluruh persyaratan teknis terpenuhi, yakni perkiraan periode fundamental struktur T_a pada kedua arah ortogonal harus kurang dari $0,8T_s$, dan periode fundamental yang digunakan untuk menghitung simpangan antar tingkat juga tidak boleh melampaui nilai T_s . Selain itu, penggunaan Persamaan (31) wajib diterapkan dalam menentukan koefisien respons seismik C_s , serta diafragma struktur harus bersifat kaku atau, jika menggunakan diafragma fleksibel, jarak antar elemen vertikal pemikul gaya seismiknya tidak boleh melebihi 12 meter. Terakhir, jika prosedur penyederhanaan desain digunakan sebagai alternatif, maka kategori desain seismik diperbolehkan untuk ditentukan melalui Tabel 8 dengan menggunakan parameter nilai SDS yang sesuai.

Tabel 2. 4 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek

Nilai S_{DS}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C

$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

(Sumber: SNI 1726 : 2019, *Tabel 8 Pasal 6.5*)

Tabel 2. 5 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik

Nilai S_{DI}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DI} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{DI} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{DI} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{DI}$	D	D

(Sumber: SNI 1726 : 2019, *Tabel 98 Pasal 6.5*)

2.13. Pemilihan Sistem Struktur dan Parameter Sistem (R , C_d , Ω)

Seluruh sistem pemikul gaya seismik yang telah ditentukan wajib dirancang serta didetailkan dengan mengikuti regulasi khusus yang berlaku bagi masing-masing sistem tersebut, di mana pengerjaannya harus merujuk sepenuhnya pada standar teknis dan dokumen acuan formal yang diidentifikasi melalui **Tabel 2.6**. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap elemen struktur memiliki tingkat daktilitas dan kapasitas yang sesuai dengan kriteria sistem yang dipilih, sebagaimana diatur dalam pedoman perancangan tahan gempa yang berlaku.

Tabel 2. 6 Faktor R, Cd, dan Ω untuk sistem pemikul gaya seismic

Sistem pemikul gaya seismic	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori desain seismic				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
19. Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
20. Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
21. Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
22. Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
23. Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
24. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2½	2½	2½	TB	TB	10	TB	TB
25. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	48	48	30
26. Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^g	TI ^h	TI ^h
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI ⁱ	TI ⁱ	TI ⁱ
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^m	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan ⁿ	3½	3 ^o	3½	10	10	10	10	10

(Sumber: SNI 1726 : 2019, Tabel 12 Pasal 7.2)

Catatan :

- (a) Faktor pembesaran simpangan lateral Cd, untuk penggunaan dalam pasal 7.8.6, 7.87, dan 7.9.1.2.
- (b) TB = Tidak dibatasi dan TI = Tidak diizinkan.
- (c) Lihat 7.2.5.4 untuk penjelasan sistem pemikul gaya seismic yang dibatasi sampai bangunan dengan ketinggian 72 meter atau kurang.
- (d) Lihat 7.2.5.4 untuk sistem pemikul gaya seismic yang dibatasi sampai bangunan dengan ketinggian 48 meter atau kurang

Periode fundamental struktur, T, tidak boleh melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dan periode fundamental pendekatan, T_a . Sebagai alternative dalam melakukan analisis untuk menentukan periode fundamental struktur, T, diizinkan secara langsung menggunakan periode bangunan pendekatan, T_a .

Tabel 2. 7 Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung

28

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{DI}	Koefisien C_U
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

2

(Sumber: SNI 1726 : 2019, Tabel 17 Pasal 7.8.2)

Periode fundamental pendekatan (T_a), dalam detik, harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$T_a = C_t h_n^x \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

35

h_n adalah ketinggian struktur (m), diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktur, dan koefisien C_t dan x ditentukan dari Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x

19

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka pemikul 100% gaya seismic yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismic :		
• Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

2

(Sumber: SNI 1726 : 2019, Tabel 18 Pasal 7.8.2.1)

2.14. Perhitungan Geser Dasar Seismik

28

Geser dasar seismik, V , dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan :

$$V = \frac{F \cdot S_{DS}}{R} W \dots\dots\dots(2.11)$$

Dengan

$$S_{DS} = \frac{2}{3} F_a S_s \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana F_a boleh diambil sebesar 1,0 untuk situs batu, 1,4 untuk situs tanah, atau ditentukan sesuai dengan 0. Untuk tujuan pasal ini, situs boleh dianggap sebagai batu jika terdapat tidak lebih dari 3 m tanah antara permukaan batu dan dasar fondasi telapak atau fondasi tika. Dalam menghitung SDs, nilai S_s harus sesuai dengan 0, tetapi tidak perlu diambil lebih besar dari 1,5. $F F F R W = 1,0$ untuk bangunan satu tingkat = 1,1 untuk bangunan dua tingkat = 1,2 untuk bangunan tiga tingkat = koefisien modifikasi respons dari Tabel 23 = berat seismik efektif struktur termasuk beban mati total struktur di atas elevasi tanah, dan beban-beban lainnya,

2.15. Distribusi Vertikal Gaya Seismik

Gaya seismik lateral, F_x , (kN) di sebarang tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut :

$$F_x = C_{vx} V \dots\dots\dots(2.13)$$

Dan

$$C_{vx} = \frac{C_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

- C_{vx} = Faktor distribusi vertikal
- V = Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN)
- W_i dan W_x = Bagian berat seismik efektif total struktur () yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x
- h_i dan h_x = Tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)
- = Eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai sebagai berikut :
 - untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, = 1
 - untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik, = 2
 - untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, = 2 atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

2.16. Penentuan Batas Simpangan Antar Lantai

Penentuan simpangan antar tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan simpangan pada pusat massa diatas dan dibawah tingkat yang ditinjau. Simpangan pusat massa di tingkat-x (δ_x) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \dots\dots\dots (2.16)$$

keterangan :

C_d = Faktor amplifikasi defleksi

δ_x = Defleksi struktur

I_e = Faktor keutamaan gedung

Simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin (Δ_a) seperti didapatkan dari untuk semua tingkat.

Tabel 2. 9 Simpangan antar tingkat izin, $\Delta_a^{a,b}$

Struktur	Kategori Risiko		
	I atau	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	0,025 h_{sx}^c	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}
Struktur dinding geser kantilever batu bata	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}
Semua struktur lainnya	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}	0,010 h_{sx}

(Sumber: SNI 1726 : 2019, Tabel 20 Pasal 7.12.1.)

Catatan :

- h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat-x.
- Untuk sistem pemikul gaya seismik yang terdiri dari hanya rangka momen dalam kategori desain seismik D, E, dan F, simpangan antar tingkat izin harus sesuai dengan persyaratan pasal 7.12.1.1.
- Tidak boleh ada batasan simpangan antar tingkat untuk struktur satu tingkat dengan dinding interior, partisi, langit-langit, dan sistem dinding eksterior yang telah didesain

untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat. Persyaratan pemisahan struktur dalam pasal 7.12.3 tidak diabaikan.

- (d) Struktur di mana sistem struktur dasar terdiri dari dinding geser batu bata yang didesain sebagai elemen vertikal kantilever dari dasar atau pendukung fondasinya yang dikonstruksikan sedemikian agar penyaluran momen di antara dinding geser (kopel) dapat diabaikan.

2.17. Detail Sambungan Kolom Balok Untuk daktilitas Tinggi

Detailing sambungan kolom-balok merupakan elemen kunci dalam memastikan rangka SRPMK mampu meredam energi gempa melalui plastifikasi terkontrol pada balok, sementara kolom tetap dalam zona elastis. Menurut SNI 2847:2019, tulangan sengkang di zona sendi plastis harus dipasang rapat, dengan jarak maksimum $\min(0,2b_w, 75 \text{ mm})$ dan panjang *anchorage* minimal $12d_b$ untuk memastikan kekuatan geser dan kontinuitas tulangan *Reduced Beam Section* (RBS) atau ‘dog-bone’ diposisikan pada kedalaman tertentu agar momen plastis terkonsentrasi di daerah ini, sehingga kolom terlindungi dari kerusakan struktur kritis (Putra & Ramadhani, 2024).

Dalam *workflow BIM*, semua ketentuan ini diotomasi melalui *Shared Parameters* di dalam *family* Revit. Parameter seperti *RBS_Depth* (kedalaman RBS), *stirrup spacing* (jarak sengkang), dan *Anchorage_Length* (panjang angkur) ditambahkan ke *template family* balok dan kolom. Dengan demikian, setiap perubahan geometri atau material, misalnya lebar penampang atau diameter tulangan utama langsung memperbarui nilai parameter tersebut di seluruh model. Skrip Dynamo atau Python kemudian secara otomatis menjalankan rule-based checks, memastikan bahwa nilai *Stirrup_Spacing* tidak melebihi 75 mm dan *Anchorage_Length* memenuhi ketentuan $\geq 12 \text{ db}$ dalam satu klik (Salsabila, 2023).

Validasi final dilakukan menggunakan *Solibri Model Checker*. Setelah model diekspor ke format IFC, Solibri API membaca parameter *RBS_Depth*, *Stirrup_Spacing*, dan *Anchorage_Length* untuk memeriksa kesesuaian dengan syarat SNI 2847:2019. Elemen yang tidak sesuai secara otomatis terdaftar dalam laporan *compliance*, memudahkan tim untuk segera melakukan koreksi dalam model. Hasil studi Wicaksono dan Hartono (2025) menunjukkan bahwa penggunaan *rule-based validation* ini mengurangi waktu pemeriksaan detailing hingga 80 % dibanding inspeksi manual, sekaligus menurunkan risiko kesalahan penempatan tulangan dan kegagalan geser.

Dengan demikian, detailing sambungan kolom-balok pada SRPMK tidak hanya mengacu pada pedoman teknis, tetapi juga terintegrasi secara penuh dalam alur kerja *BIM* dari parameterisasi *Revit Family* hingga validasi otomatis sehingga memastikan struktur Apartemen Az-Zahr memenuhi kriteria daktilitas tinggi dengan efisiensi dan akurasi maksimum.

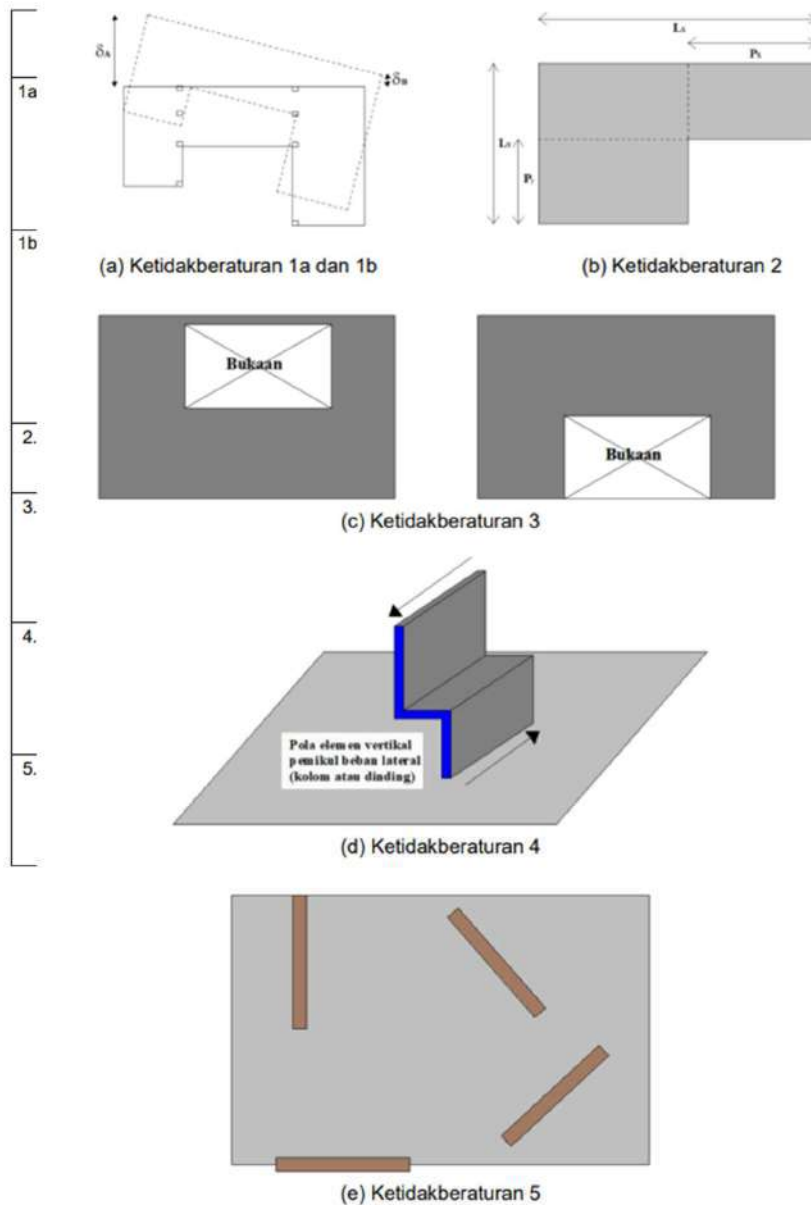
2.18. Konfigurasi Ketidakberaturan Struktur Gedung

Dalam perencanaan struktur gedung tahan gempa, konfigurasi denah dan vertikal bangunan idealnya dirancang secara simetris dan beraturan untuk menghindari konsentrasi tegangan lokal. Namun, tuntutan fungsional arsitektural sering kali menghasilkan bentuk gedung yang tidak beraturan. Berdasarkan Pasal 7.3 SNI 1726:2019, ketidakberaturan struktur secara tegas diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama, yaitu ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal.

2.18.1. Ketidakberaturan Horizontal

Struktur yang mempunyai satu atau lebih tipe ketidakberaturan seperti yang terdapat dalam Tabel 2.10 harus dinyatakan mempunyai ketidakberaturan struktur horizontal. Struktur-struktur yang didesain untuk kategori desain seismik sebagaimana yang terdapat dalam Tabel 2.10 harus memenuhi persyaratan dalam pasal-pasal yang dirujuk dalam tabel tersebut.

Tabel 2. 10 Ketidakberaturan horizontal pada struktur



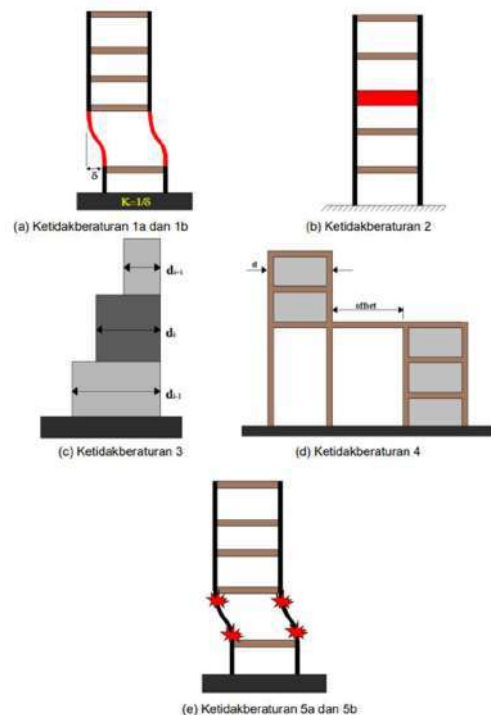
Gambar 2. 9 Ketidakberaturan Horizontal

2.18.2. Ketidakberaturan Vertikal

Struktur yang mempunyai satu atau lebih tipe ketidakberaturan seperti yang terdapat dalam Tabel 14 harus dinyatakan mempunyai ketidakberaturan vertikal. Struktur-struktur yang didesain untuk kategori desain seismik sebagaimana yang terdapat dalam Tabel 14 harus memenuhi persyaratan dalam pasal-pasal yang dirujuk dalam tabel tersebut.

Tabel 2. 11 Ketidakberaturan vertikal pada struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 16	D, E, dan F
1b.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	0 Tabel 16	E dan F D, E, dan F
2.	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	D, E, dan F
3.	Ketidakberaturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat didekatnya.	Tabel 16	D, E, dan F
4.	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	0 0 Tabel 16	B, C, D, E, dan F D, E, dan F D, E, dan F
5a.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	0 Tabel 16	E dan F D, E, dan F
5b.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	0 0 Tabel 16	D, E, dan F B dan C D, E, dan F



Gambar 2. 10 Ketidakberaturan Vertikal

2.19. *Parametric Design* dan Optimasi Elemen Beton Bertulang

Seiring berkembangnya kapabilitas *BIM*, teknik *parametric design* diterapkan untuk mengotomasi optimasi dimensi elemen beton bertulang dengan memadukan kriteria drift maksimum dan efisiensi material. Martínez, Pérez, dan García (2023) memperkenalkan suatu kerangka kerja parametrik *BIM* berbasis *Rhino Grasshopper* yang menggunakan algoritma genetik untuk mengevaluasi ribuan variasi balok dan kolom, lalu memilih konfigurasi yang meminimalkan volume beton tanpa melampaui simpangan antar lantai $0,02 \times \text{story height}$. Hasil optimasi mereka menunjukkan pengurangan volume tulangan hingga 12 % dengan kinerja struktural tetap terpenuhi.

Dalam konteks SRPMK, Oktavianus, Siregar, dan Widodo (2024) mengembangkan skrip Dynamo di Revit yang melakukan *what-if analysis* pada parameter *Beam.Width*, *Beam.Depth*, dan *Column.SectionSize*. Setiap iterasi, skrip menghitung simpangan antar lantai secara linier dan mempresentasikan hasilnya dalam *schedule Revit*, memungkinkan *engineer* memilih desain terbaik dengan cepat. Pendekatan ini menghemat waktu evaluasi desain hingga 60 % dibandingkan metode manual (Oktavianus et al., 2024).

2.20. Integrasi *BIM* Dengan *Software* Analisa Struktur

Untuk menjembatani model *BIM* dengan analisis seismik, Salsabila dan Arya (2024) mendemonstrasikan alur ekspor model Revit ke RSAP melalui IFC/DXF, mempertahankan parameter teknis seperti jarak efektif (d), luas tulangan tarik (A_s), dan tegangan leleh (f_y). RSAP kemudian menghitung respons spektrum dan pushover, dan hasil plastic hinge locations diekspor kembali ke Revit untuk visualisasi 3D. Validasi silang dengan ETABS oleh Ansor dan Widodo (2024) menunjukkan bahwa gaya geser dasar dan kurva kapasitas *pushover* memiliki selisih kurang dari 3 %, sementara *workflow* otomatis ini mempersingkat waktu setup analisis hingga 25 %.

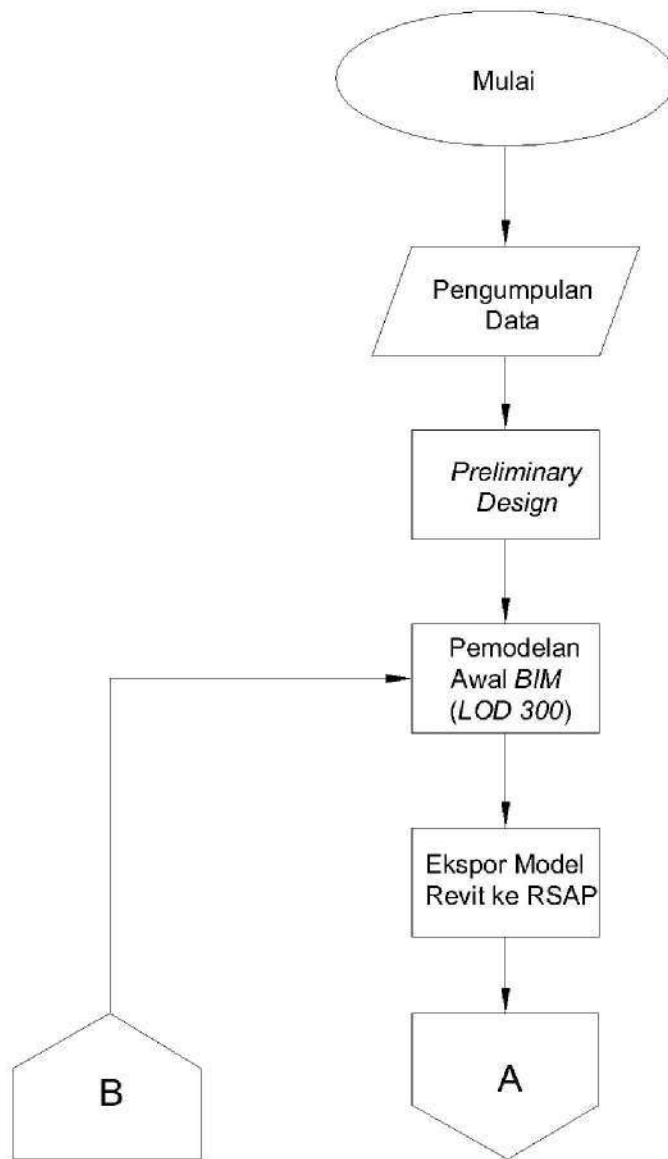
Selain itu, *plugin live-link* seperti *BIM-ETABS Link* dan *SOFiSTiK BIM Tools* memungkinkan pertukaran data secara langsung antara Revit dan ETABS tanpa memerlukan *file* perantara, sehingga setiap perubahan parameter *family* segera tercermin dalam model analisis (Alhamidi & Hori, 2023). Alhamidi dan Hori (2023) berhasil menerapkan metode ini untuk analisis *pushover non-linear*, mengekspor lokasi sendi plastis kembali ke model *BIM*, dan membandingkannya dengan kriteria daktilitas SNI 2847:2019 dalam Revit.

BAB III

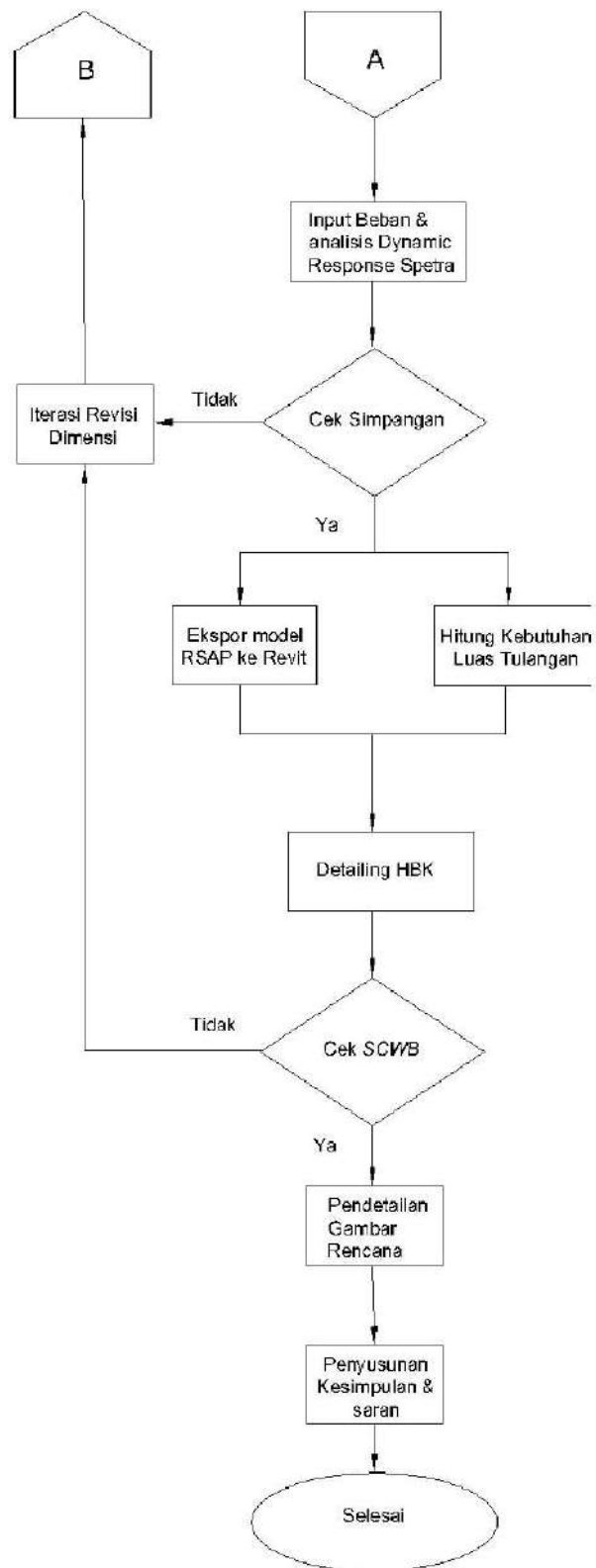
METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Rencana

Perencanaan struktur bangunan gedung apartemen Az-Zahr di Kota Padang menggunakan metode SRPMK akan diuraikan dalam bentuk diagram alir perencanaan yang ditampilkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Perencanaan



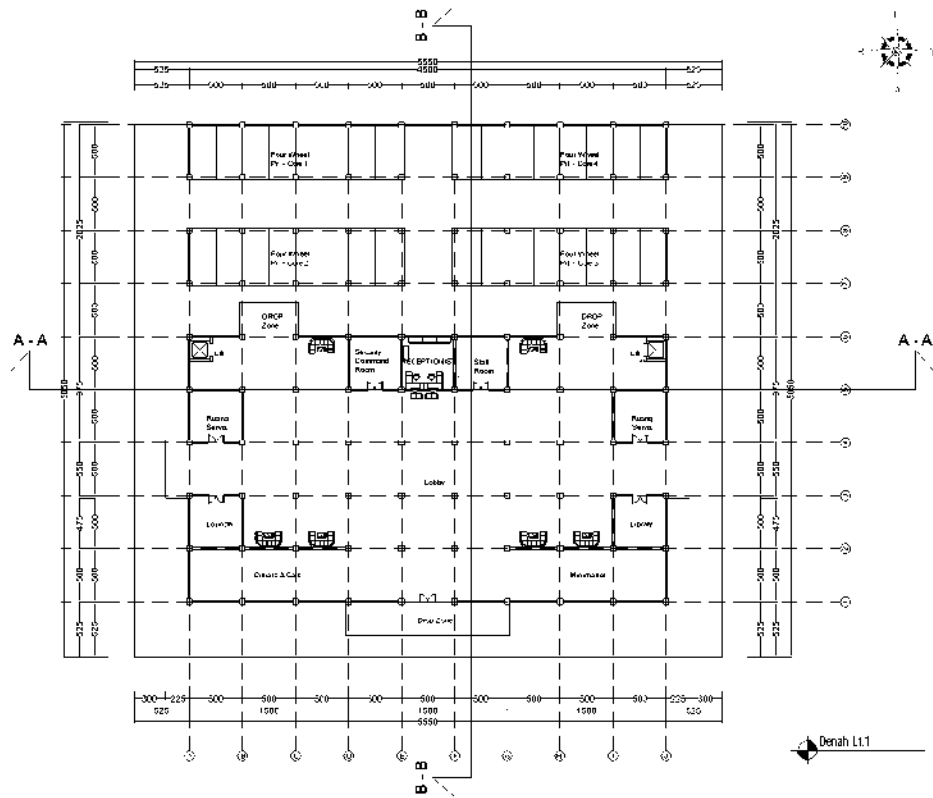
Gambar 3.1 Diagram Alir Perencanaan (Lanjutan)

3.2 Penjelasan Diagram Alir Rencana

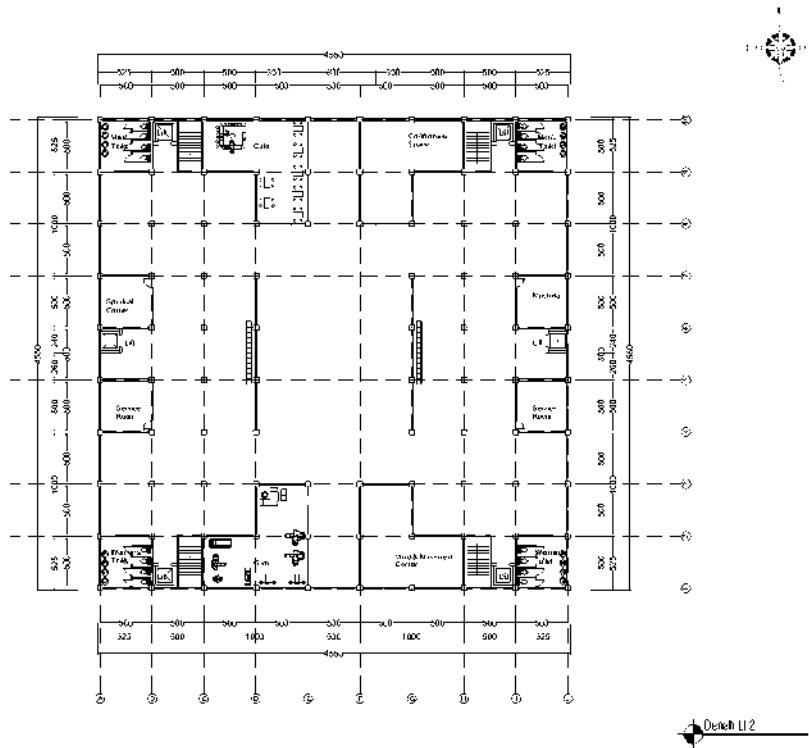
Dari Gambar 3.1, Metodologi perencanaan diuraikan secara rinci sebagai berikut:

1. Pengumpulan data yang dibutuhkan untuk perencanaan, meliputi:
 - a) Gambar Rencana Struktur gedung
 - b) Data karakteristik tanah dari hasil investigasi lapangan, yaitu uji CPT (*Cone Penetration Test*) dan SPT (*Standard Penetration Test*)
2. Pemilihan sistem struktur untuk menahan beban lateral dan vertikal harus disesuaikan dengan salah satu sistem yang telah ditetapkan dalam standar perencanaan. Dalam Perencanaan ini, sistem struktur yang digunakan adalah Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), yang diterapkan berdasarkan spesifikasi bangunan sebagai berikut:

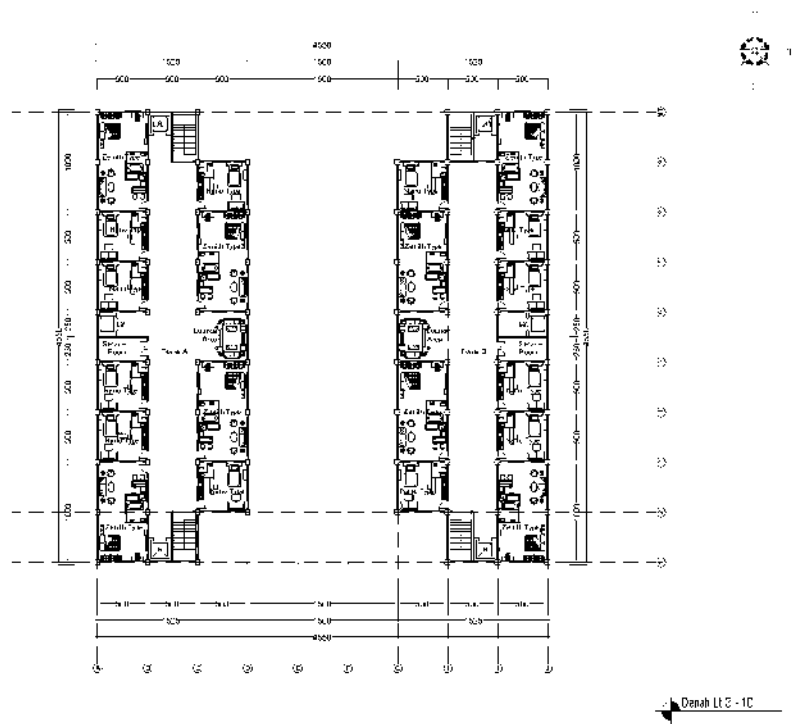
- a) Nama Gedung : Apartemen Az-Zahr
- b) Fungsi Gedung : Apartemen
- c) Lokasi : Kota Padang
- d) Tinggi Gedung : 40 Meter
- e) Elevasi Lantai : 4 Meter
- f) Jumlah Lantai : 10 Lantai
- g) Lebar Bangunan : 45 Meter
- h) Panjang Bangunan : 45 Meter
- i) Mutu Beton (f_c') : 35 MPa
- j) Mutu Baja (f_y) : 420 MPa
- k) Struktur Bangunan : Beton bertulang
- l) Struktur Pondasi : Tiang pancang beton



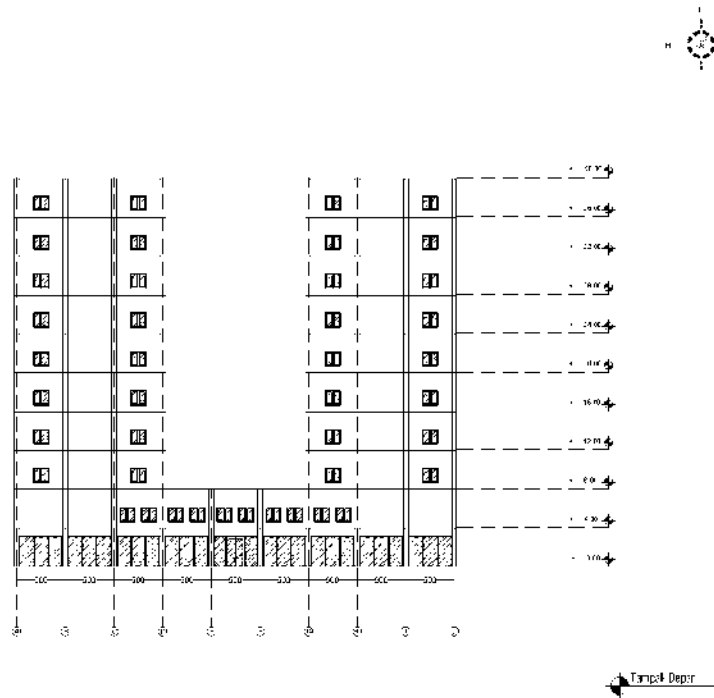
Gambar 3.2 Denah Lantai 1



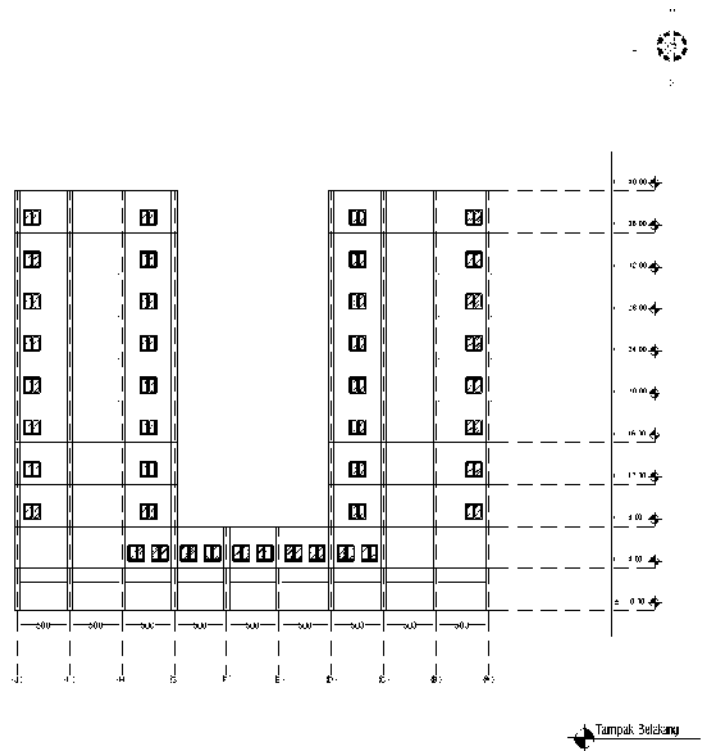
Gambar 3. 3 Denah Lantai 2



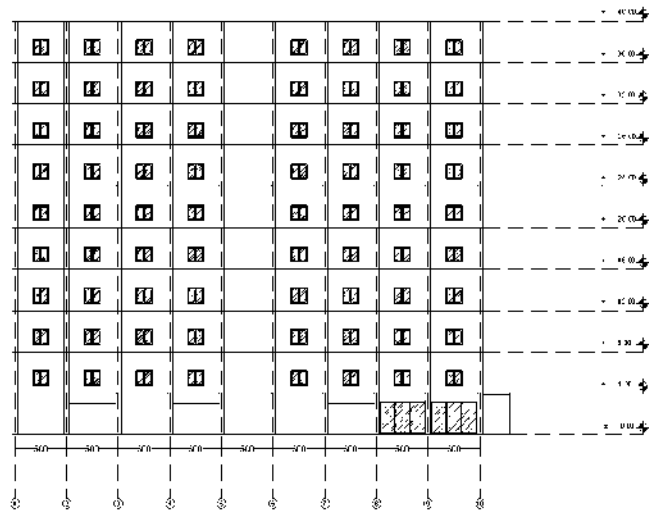
Gambar 3. 4 Denah Lantai 3-10



Gambar 3. 5 Tampak Depan

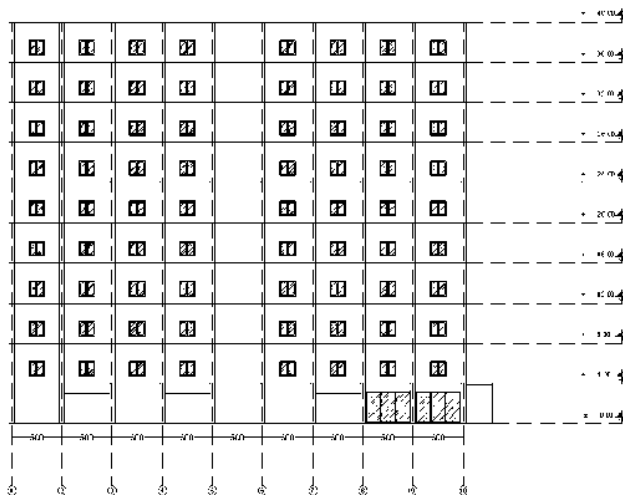


Gambar 3. 6 Tampak Belakang



Tampak Samping Kiri

Gambar 3. 7 Tampak Samping Kanan



Tampak Samping Kiri

Gambar 3. 8 Tampak Samping Kiri

3. *Preliminary Design*

Desain awal (*Preliminary Design*) merupakan tahap penting dalam proses perencanaan struktur bangunan. Langkah pertama adalah menentukan dimensi balok, yang mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019 Pasal 18.6. Selanjutnya, ketebalan pelat ditentukan berdasarkan panduan dari Pasal 18.7, dan terakhir, ukuran kolom dirancang sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Pasal 7 pada standar yang sama.

4. Pemodelan Awal Pada *BIM (LOD 300)*

Setelah dimensi awal elemen struktur utama ditetapkan melalui tahap *preliminary design*, langkah selanjutnya adalah mengimplementasikannya ke dalam pemodelan struktur 3D berbasis *Building Information Modeling (BIM)*. Model ini berfungsi sebagai representasi digital presisi yang kemudian diekspor ke perangkat lunak analisis struktur untuk menjalankan simulasi beban. Dalam perencanaan struktur Gedung Apartemen Az-Zahr, sistem pembebanan didasarkan pada ketentuan peraturan teknis terbaru sebagai berikut:

a) Penentuan beban mati dan beban hidup direncanakan dengan mengacu pada SNI 1727:2020, yang memuat panduan beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lainnya. Beban mati mencakup berat sendiri elemen struktural dan komponen tambahan tetap, sedangkan beban hidup ditentukan berdasarkan fungsi ruangan pada gedung apartemen.

b) Kombinasi pembebanan yang diterapkan pada struktur bangunan ini mengikuti ketentuan SNI 2847:2019 Pasal 5.3.1, dengan rumusan sebagai berikut:

Kombinasi 1: $1,4 D$

Kombinasi 2: $1,2 D + 1,6 L + 0,5 (Lr \text{ atau } R)$

Kombinasi 3: $1,2 D + 1,6 (Lr \text{ atau } R) + (1,0 L \text{ atau } 0,5 W)$

Kombinasi 4: $1,2 D + 1,0 W + 1,0 L + 0,5 (Lr \text{ atau } R)$

Kombinasi 5: $1,2 D + 1,0 E + 1,0 L$

Kombinasi 6: $0,9 D + 1,0 W$

Kombinasi 7: $0,9 D + 1,0 E$

c) Untuk beban gempa, perencanaan mengacu pada SNI 1726:2019, di mana beban gempa dianggap sebagai beban dinamis yang mewakili respons aktual struktur terhadap gerakan tanah saat terjadi gempa. Perhitungan beban gempa

mempertimbangkan karakteristik respons dinamis struktur berdasarkan spektrum desain dan parameter seismik wilayah Kota Padang.

5. Ekspor Model Revit ke RSAP

Melakukan proses integrasi data (interoperabilitas) dengan mengekspor model fisik elemen beton bertulang yang telah dibuat di Autodesk Revit ke dalam perangkat lunak analisis struktur Robot Structural Analysis Professional (RSAP).

6. Verifikasi Struktur Global (Cek nilai inter story drift)

Jalankan analisis respons spektrum gempa:

Hitung *inter-story drift* maksimum

Periksa partisipasi massa, gaya lateral, dan syarat SRPMK lain

Keputusan:

jika sudah aman, dan dapat dilanjutkan ke detailing sambungan.

7. Iterasi Redesain dan Penyesuaian Dimensi Struktur

Apabila nilai simpangan melampaui batas izin, dilakukan modifikasi dimensi elemen pada model *BIM* (seperti memperbesar penampang kolom atau balok) secara iteratif hingga struktur memenuhi kriteria kekakuan yang dipersyaratkan.

8. Ekspor Model RSAP ke Revit & Perhitungan Kebutuhan Luas Tulangan

- Ekspor ke Revit: Mengembalikan data hasil optimasi penampang dari RSAP ke Revit agar model pusat BIM tetap mutakhir.
- Hitung Kebutuhan Luas Tulangan: Menghitung luasan baja tulangan ($f_y = 420$ MPa) yang dibutuhkan oleh balok dan kolom beton bertulang ($f_c' = 35$ MPa) berdasarkan gaya dalam hasil keluaran RSAP.

9. Detailing Sambungan Kolom Balok

Setelah struktur dinyatakan kaku dan memenuhi kriteria simpangan (jalur "Ya"), langkah selanjutnya adalah Desain Penulangan Elemen dengan mengacu pada SNI 2847:2019. Karena Gedung Apartemen Az-Zahr direncanakan menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), maka dilakukan perhitungan daktilitas penuh pada setiap elemen. Hal ini mencakup Detailing Sambungan Kolom-Balok untuk menjamin terpenuhinya prinsip *strong column-weak beam*. Pendetailan ini memastikan bahwa jika terjadi gempa rencana, kerusakan akan terjadi pada balok terlebih dahulu

sebagai sendi plastis, sementara kolom tetap stabil untuk mencegah keruntuhan total bangunan.

Siapkan *shop drawing* sambungan

10. Verifikasi Sambungan

Tahap verifikasi struktur global dilakukan dengan menjalankan analisis respons spektrum untuk meninjau parameter partisipasi massa ragam (minimal 90%), gaya geser dasar, serta simpangan antar lantai (*inter-story drift*). Keputusan dalam tahap ini didasarkan pada kontrol simpangan; apabila *drift* melampaui batas izin $\Delta_a = 0,020h$ mengacu pada SNI 1726:2019 Tabel 20, maka struktur dinyatakan belum memenuhi syarat keamanan sehingga harus dilakukan iterasi redesain pada model *BIM*, sedangkan jika *drift* < batas izin, maka analisis dinyatakan terpenuhi dan pengerjaan dilanjutkan ke tahap detailing sambungan. Adapun maksud dari kondisi terpenuhi tersebut adalah tercapainya kriteria kekakuan struktur untuk membatasi kerusakan non-struktural, stabilitas struktur yang telah memvalidasi seluruh moda getar dominan serta efek P-Delta, serta tercapainya kekuatan penampang di mana seluruh elemen memiliki rasio kapasitas < 1,0 dan memenuhi prasyarat *strong column-weak beam* sebagai landasan utama desain daktilitas SRPMK

11. Pendetailan Gambar Kerja

Tahap pendetailan gambar rencana dilakukan dengan mengekstrak seluruh informasi teknis dari model tiga dimensi yang telah tervalidasi ke dalam bentuk dokumentasi dua dimensi. Proses pengerjaan diawali dengan pembuatan denah struktural, potongan memanjang dan melintang, serta detail penulangan komponen sistem rangka pemikul momen khusus yang dilakukan secara langsung di dalam perangkat lunak Autodesk Revit mengacu pada standar nasional Indonesia dua delapan empat tujuh tahun dua ribu sembilan belas. Keunggulan utama pada tahap pengerjaan ini adalah pemanfaatan sistem tag dan anotasi otomatis yang terintegrasi dengan parameter model, sehingga setiap perubahan dimensi yang dilakukan pada tahap analisis akan secara otomatis diperbarui pada seluruh lembar gambar kerja.

12. Penyusunan Kesimpulan & Saran

Tahap akhir melibatkan sintesis hasil penelitian mengenai efektivitas implementasi *BIM* dalam perencanaan SRPMK untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi desain struktur tahan gempa.

BAB IV

PRELIMINARY DESIGN DAN PEMODELAN BIM

4.1. Data Perencanaan

Perencanaan gedung Apartemen Az-Zahr di Kota Padang ini menggunakan struktur beton bertulang pada keseluruhan struktur gedung. Berikut ini merupakan data umum perencanaan yang akan digunakan spesifikasi bangunan sebagai berikut:

4.2. Perencanaan Dimensi Balok

4.2.1. Perencanaan Dimensi Balok Induk

Menurut persyaratan SNI 2847-2019 pasal 18.6.2.1 disebutkan, untuk menentukan batasan dimensi suatu balok menggunakan acuan berikut:

1. Bentang Bersih $\ell_n \geq 4 \times$ tinggi efektif,
2. Lebar penampang $b_w > 0,3h$ dan $b_w \geq 250$ mm,
3. Lebar proyeksi balok melintasi lebar kolom tidak boleh melebihi nilai c_2 dan $0,75 c_l$ yang lebih kecil pada setiap sisi kolom.

Sesuai dengan SNI 2847-2019 pasal 9.3.1.1. menggunakan rumus:

- 1) Untuk tinggi balok (h) Dua tumpuan sederhana : $h = \frac{L}{16}$
- 2) Untuk lebar balok (b) : $b = \frac{2}{3} \cdot h$

Dimensi balok induk yang direncanakan menggunakan balok induk dengan panjang bentang 500 cm, yaitu:

Balok induk menggunakan bentang $L = 5$ m. Dan $f_y = 420$ Mpa adalah :

$$h = \frac{L}{16} = \frac{500}{16} = 31,25 \text{ cm, maka dipakai } h = 60 \text{ cm}$$

$$b = 0,3 \times h = 0,3 \times (60) = 18 \text{ cm, maka dipakai } b = 30 \text{ cm}$$

Jadi dimensi balok induk yang dipakai adalah 30 cm x 60 cm

4.2.2. Perencanaan Dimensi Balok Anak

Dimensi balok anak yang direncanakan menggunakan balok anak dengan panjang bentang 500 cm, yaitu:

Balok anak menggunakan bentang 5 m

$$h = \frac{L}{21} = \frac{500}{21} = 23,81 \text{ cm maka dipakai } h = 40 \text{ cm}$$

$b = 0,3 \times h = 0,3 \times (40) = 12 \text{ cm}$ maka dipakai $b = 25 \text{ cm}$

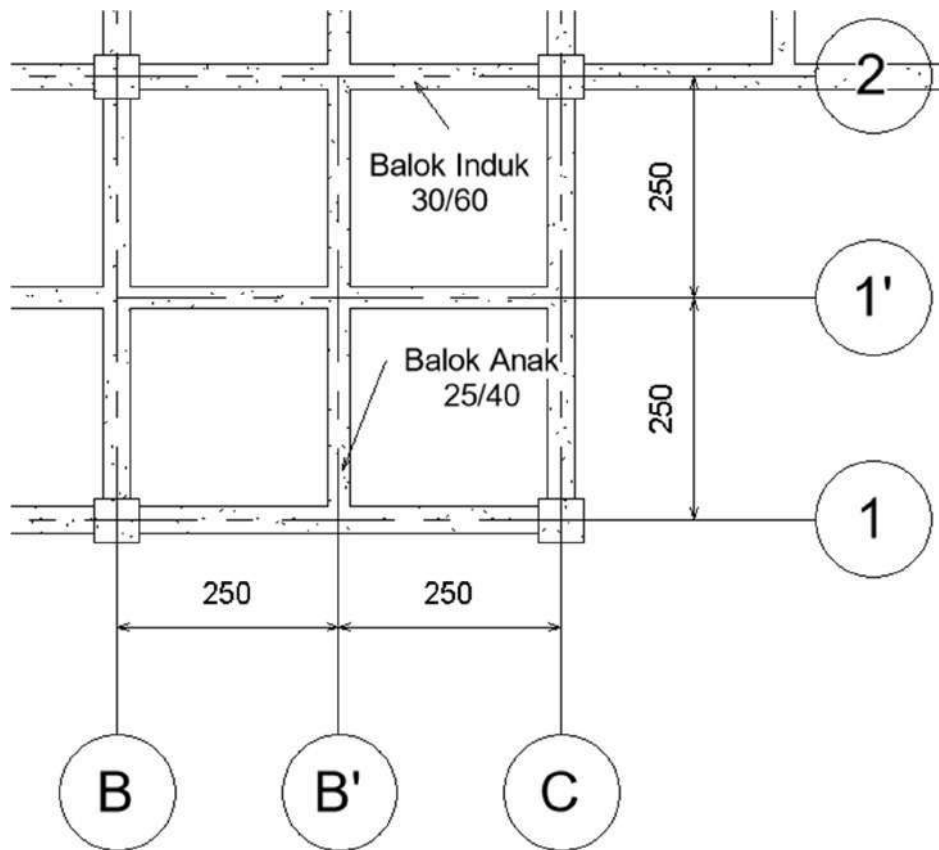
Jadi dimensi balok anak yang dipakai adalah $25 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$

4.3. Perencanaan Dimensi Plat

Plat yang akan direncanakan hanya menahan beban lentur dan harus memenuhi syarat lendutan, ketebalan minimum harus memenuhi syarat SNI 2847-2019 pasal 8.3.1.2. Plat yang direncanakan adalah plat atap dan plat lantai.

4.3.1. Perencanaan Plat Atap

Perencanaan pelat atap ditinjau dari Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Perencanaan Plat Atap

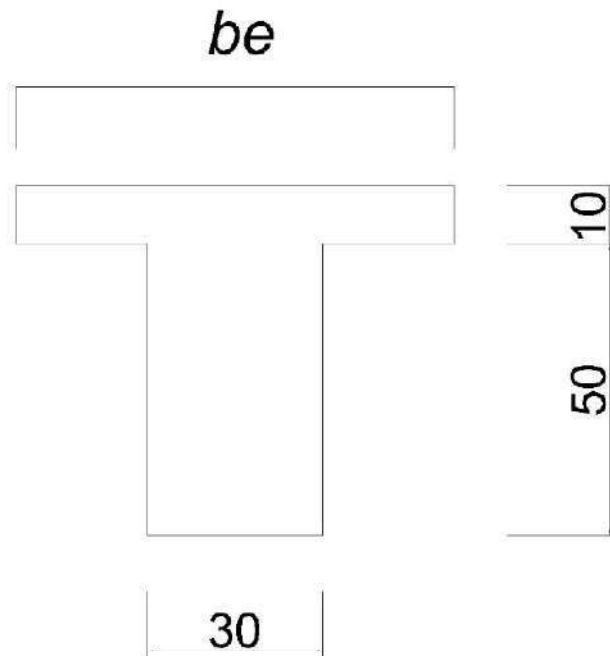
- Bentang bersih Sumbu Panjang (As B-C)
 $Ln = 5\text{m} = 500 \text{ cm}$
- Bentang bersih sumbu pendek (As B-B')
 $Sn = 2,50\text{m} = 250 \text{ cm}$
- Didapatkan nilai β_1

$$\beta_1 = \frac{L_n}{S_n} = \frac{500}{250} = 2,00 \leq 2 \text{ (Two Way Slab)}$$

Tebal plat atap karena tidak boleh kurang dari 125 mm jika $0,2 < n \alpha_{fm} < 2,0$ dan tidak boleh kurang dari 90 mm jika nilai $a > 2,0$. Maka, direncanakan menggunakan tebal plat atap yaitu $h = 100$ mm.

➤ **Menentukan nilai rasio kekakuan (α) dengan balok induk 30/60 cm**

Menentukan lebar efektif (b_e) :



Gambar 4. 2 Penampang Balok Induk Plat Atap

Perhitungan rasio kekakuan (α) diawali dengan penentuan geometri penampang balok induk melalui Gambar 4.2. Karena balok dan pelat dicor secara bersamaan (monolit), maka pelat akan berfungsi sebagai sayap (*flange*) balok. Narasi perhitungan di bawah ini menunjukkan proses penentuan lebar efektif (b_e) terkecil sesuai regulasi **SNI 2847:2019** untuk mendapatkan faktor modifikasi k . Faktor ini mencerminkan peningkatan kekakuan balok akibat adanya kontribusi pelat, yang nantinya menjadi variabel utama dalam analisis distribusi momen dan kontrol tebal pelat dua arah.

$$b_e = b_w + 2 h_b = 30 + 2 (60 - 10) = 130 \text{ cm}$$

$$b_e = b_w + 8 h_f = 30 + 8 (10) = 110 \text{ cm}$$

Diambil b_e terkecil yaitu 110 cm

Faktor modifikasi k :

$$k = \frac{1 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right) \cdot \left[4 - 6 \left(\frac{h_f}{h}\right) + 4 \left(\frac{h_f}{h}\right)^2 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)^3\right]}{1 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)}$$

$$k = \frac{1 + \left(\frac{110}{30} - 1\right) \cdot \left(\frac{10}{60}\right) \cdot \left[4 - 6 \left(\frac{10}{60}\right) + 4 \left(\frac{10}{60}\right)^2 + \left(\frac{110}{30} - 1\right) \cdot \left(\frac{10}{60}\right)^3\right]}{1 + \left(\frac{110}{30} - 1\right) \cdot \left(\frac{10}{60}\right)}$$

$$k = 1,65$$

Balok Induk bentang L = 500 cm (As B-C)

Momen inersia penampang T :

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h^3 \times k = \frac{1}{12} \times 30 \times 60^3 \times 1,65 = 891000,00 \text{ cm}^4$$

Momen inersia pelat :

$$I_p = \frac{1}{12} \times L \times h_f^3 = \frac{1}{12} \times 500 \times 10^3 = 41666,67 \text{ cm}^4$$

Mutu beton (f_c') yang digunakan ialah 35 Mpa, sehingga :

$$E_{cb} = E_{cp} = 4700\sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57 \text{ Mpa}$$

Diperoleh rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$\alpha_{fm1} = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cp} \times I_p} = \frac{27805,57 \times 891000,00}{27805,57 \times 41666,67} = 21,38 > 1 \text{ (OK)}$$

Balok Induk bentang L = 250 cm (As B-B')

Momen inersia penampang T :

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h^3 \times k = \frac{1}{12} \times 30 \times 60^3 \times 1,65 = 891000,00 \text{ cm}^4$$

Momen inersia pelat :

$$I_p = \frac{1}{12} \times L \times h_f^3 = \frac{1}{12} \times 250 \times 10^3 = 20833,3 \text{ cm}^4$$

Mutu beton yang digunakan ialah (f_c') 35 Mpa, sehingga :

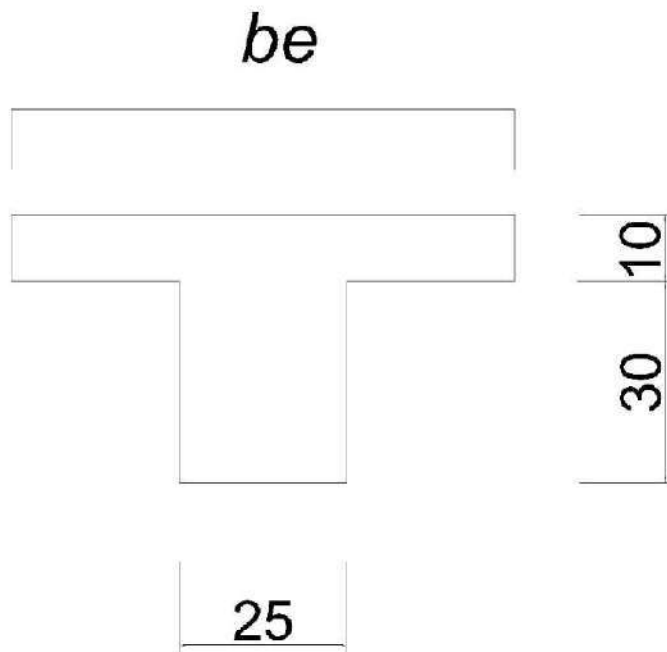
$$E_{cb} = E_{cp} = 4700\sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57 \text{ Mpa}$$

Diperoleh rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$\alpha_{fm2} = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cp} \times I_p} = \frac{27805,57 \times 891000,00}{27805,57 \times 20833,3} = 42,77 > 1 \text{ (OK)}$$

➤ Menentukan nilai rasio kekakuan (α) dengan balok anak 25/40 cm

Menentukan lebar efektif (b_e) :



Gambar 4. 3 Penampang Balok Anak Plat Atap

Melalui visualisasi pada **Gambar 4.3**, ditentukan dimensi penampang balok anak 25/40 cm untuk mencari nilai lebar efektif (be). Penentuan be berdasarkan kriteria **SNI 2847:2019** bertujuan untuk menghitung faktor modifikasi k yang mencerminkan kekakuan aktual penampang T. Faktor k ini kemudian digunakan sebagai variabel pengali dalam mencari momen inersia balok (I_b), yang merupakan komponen utama dalam penentuan rasio kekakuan (α) sistem pelat dua arah pada area atap

$$be = b_w + 2 h_b = 25 + 2 (40 - 10) = 125\text{cm}$$

$$be = b_w + 8 h_f = 25 + 8 (10) = 105 \text{ cm}$$

Diambil be terkecil yaitu 105 cm

Faktor modifikasi k :

$$k = \frac{1 + \left(\frac{be}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right) \cdot \left[4 - 6 \left(\frac{h_f}{h}\right) + 4 \left(\frac{h_f}{h}\right)^2 + \left(\frac{be}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)^3\right]}{1 + \left(\frac{be}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)}$$

$$k = \frac{1 + \left(\frac{105}{25} - 1\right) \cdot \left(\frac{10}{40}\right) \cdot \left[4 - 6 \left(\frac{10}{40}\right) + 4 \left(\frac{10}{40}\right)^2 + \left(\frac{105}{25} - 1\right) \cdot \left(\frac{10}{40}\right)^3\right]}{1 + \left(\frac{105}{25} - 1\right) \cdot \left(\frac{10}{40}\right)}$$

$$k = 1,8$$

Balok anak bentang L = 500 cm (As B-C)

Momen inersia penampang T :

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h^3 \times k = \frac{1}{12} \times 25 \times 40^3 \times 1,8 = 240000,00 \text{ cm}^4$$

Momen inersia pelat :

$$I_p = \frac{1}{12} \times L \times h_f^3 = \frac{1}{12} \times 500 \times 10^3 = 41666,67 \text{ cm}^4$$

Mutu beton yang digunakan ialah (f_c') 35 Mpa, sehingga :

$$E_{cb} = E_{cp} = 4700\sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57 \text{ Mpa}$$

Diperoleh rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$\alpha_{fm3} = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cp} \times I_p} = \frac{27805,57 \times 240000,00}{27805,57 \times 41666,67} = 5,76 > 1$$

Balok anak bentang L = 250 cm (As B-B')

Momen inersia penampang T :

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h^3 \times k = \frac{1}{12} \times 25 \times 40^3 \times 1,8 = 240000,00 \text{ cm}^4$$

Momen inersia pelat :

$$I_p = \frac{1}{12} \times L \times h_f^3 = \frac{1}{12} \times 250 \times 10^3 = 20833,33 \text{ cm}^4$$

Mutu beton yang digunakan ialah (f_c') 35 Mpa, sehingga :

$$E_{cb} = E_{cp} = 4700\sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57 \text{ Mpa}$$

Diperoleh rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$\alpha_{fm4} = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cp} \times I_p} = \frac{27805,57 \times 240000,00}{27805,57 \times 20833,33} = 11,52 > 1 \text{ (OK)}$$

Dari keempat balok diatas diperoleh nilai rata-rata α_{fm} adalah :

$$\alpha_{fm} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{4} = \frac{21,38 + 42,77 + 5,76 + 11,52}{4} = 20,36 > 9 \text{ cm}$$

Diperoleh $\alpha_{fm} > 2$, maka untuk menentukan ketebalan pelat digunakann persamaan seperti pada **SNI 2847:2019** Pasal 8.3.1.2 d dan tidak boleh kurang dari 90 mm.

$$h = \frac{\ln\left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 9\beta} = \frac{500\left(0,8 + \frac{280}{1400}\right)}{36 + 9(2,00)} = 9,26 \text{ cm} > 9 \text{ cm}$$

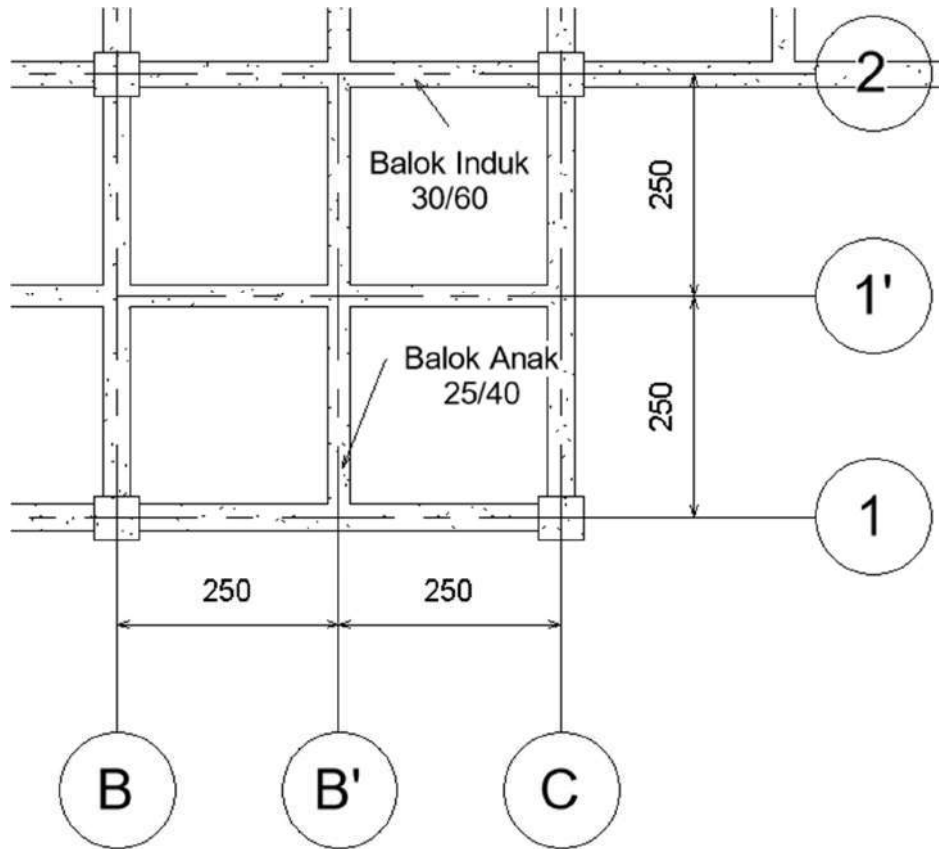
Karena tebal minimum $h_{min} > 90 \text{ mm}$,

maka tebal pelat yang dipakai adalah tebal pelat atap yang direncanakan

$$h_{rencana} = 100 \text{ mm} > h_{min} = 92,6 \text{ mm (OK)}$$

4.3.2. Perencanaan Plat Lantai

Perencanaan pelat lantai ditinjau dari gambar 4.4



Gambar 5. 1 Perencanaan Plat Lantai

- Bentang bersih sumbu panjang (As B-C)

$$Ln = 5m = 500 \text{ cm}$$

- Bentang bersih sumbu pendek (As B-B')

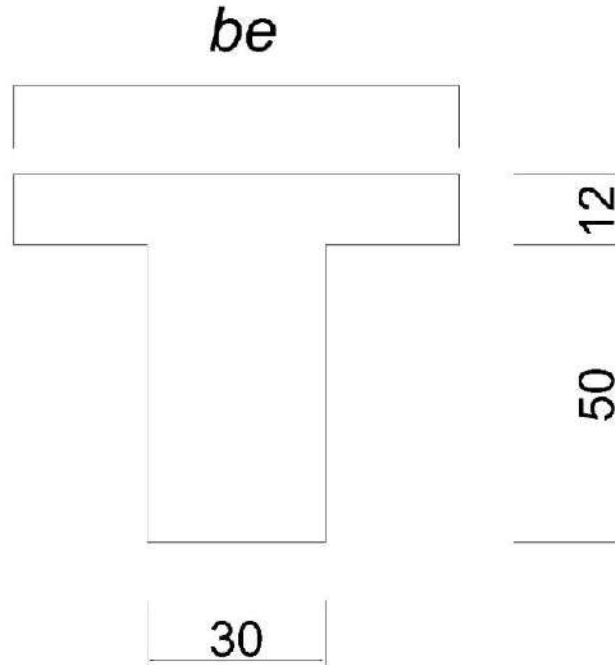
$$Sn = 2,50m = 250 \text{ cm}$$

- Didapatkan nilai β_1

$$\beta_1 = \frac{Ln}{Sn} = \frac{500}{250} = 2,00 \leq 2 \text{ (Two Way Slab)}$$

- **Menentukan nilai rasio kekakuan (α) dengan balok induk 30/60 cm**

Menentukan lebar efektif (b_e) :



Gambar 5. 2 Penampang Balok Plat Lantai

$$b_e = b_w + 2 h_b = 30 + 2 (60 - 12) = 126 \text{ cm}$$

$$b_e = b_w + 8 h_f = 30 + 8 (12) = 126 \text{ cm}$$

Diambil b_e terkecil yaitu 126 cm

Faktor modifikasi k :

$$k = \frac{1 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right) \cdot \left[4 - 6 \left(\frac{h_f}{h}\right) + 4 \left(\frac{h_f}{h}\right)^2 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)^3\right]}{1 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)}$$

$$k = \frac{1 + \left(\frac{126}{30} - 1\right) \cdot \left(\frac{12}{60}\right) \cdot \left[4 - 6 \left(\frac{12}{60}\right) + 4 \left(\frac{12}{60}\right)^2 + \left(\frac{126}{30} - 1\right) \cdot \left(\frac{12}{60}\right)^3\right]}{1 + \left(\frac{126}{30} - 1\right) \cdot \left(\frac{12}{60}\right)}$$

$$k = 1,78$$

Balok Induk bentang L = 500 cm (As B-C)

Momen inersia penampang T :

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h^3 \times k = \frac{1}{12} \times 30 \times 60^3 \times 1,78 = 961200,00 \text{ cm}^4$$

Momen inersia pelat :

$$I_p = \frac{1}{12} \times L \times h_f^3 = \frac{1}{12} \times 500 \times 12^3 = 72000,00 \text{ cm}^4$$

Mutu beton yang digunakan ialah (f_c') 35 Mpa, sehingga :

$$E_{cb} = E_{cp} = 4700\sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57 \text{ Mpa}$$

Sehingga rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$\alpha_{fm1} = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cp} \times I_p} = \frac{27805,57 \times 961200,00}{27805,57 \times 72000,00} = 13,35 > 1 \text{ (OK)}$$

Balok Induk bentang L = 250 cm (As B-B')

Momen inersia penampang T :

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h^3 \times k = \frac{1}{12} \times 30 \times 60^3 \times 1,78 = 961200,00 \text{ cm}^4$$

Momen inersia pelat :

$$I_p = \frac{1}{12} \times L \times h_f^3 = \frac{1}{12} \times 250 \times 12^3 = 36000,00 \text{ cm}^4$$

Mutu beton yang digunakan ialah (f_c') 35 Mpa, sehingga :

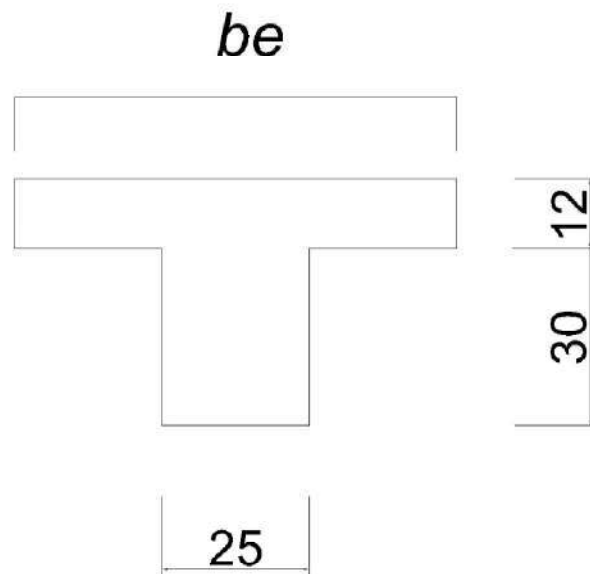
$$E_{cb} = E_{cp} = 4700\sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57 \text{ Mpa}$$

Sehingga rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$\alpha_{fm2} = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cp} \times I_p} = \frac{27805,57 \times 961200,00}{27805,57 \times 36000,00} = 26,70 > 1 \text{ (OK)}$$

➤ **Menentukan nilai rasio kekakuan (α) dengan balok anak 25/40 cm**

Menentukan lebar efektif (b_e) :



Gambar 4. 4 Penampang Balok Anak Plat Lantai

$$b_e = b_w + 2 h_b = 25 + 2 (40 - 12) = 81 \text{ cm}$$

$$b_e = b_w + 8 h_f = 25 + 8 (12) = 121 \text{ cm}$$

Diambil b_e terkecil yaitu 81 cm

Faktor modifikasi k :

$$k = \frac{1 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right) \cdot \left[4 - 6 \left(\frac{h_f}{h}\right) + 4 \left(\frac{h_f}{h}\right)^2 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)^3\right]}{1 + \left(\frac{b_e}{b_w} - 1\right) \cdot \left(\frac{h_f}{h}\right)}$$

$$k = \frac{1 + \left(\frac{81}{25} - 1\right) \cdot \left(\frac{12}{40}\right) \cdot \left[4 - 6 \left(\frac{12}{40}\right) + 4 \left(\frac{12}{40}\right)^2 + \left(\frac{81}{25} - 1\right) \cdot \left(\frac{12}{40}\right)^3\right]}{1 + \left(\frac{81}{25} - 1\right) \cdot \left(\frac{12}{40}\right)}$$

$$k = 1,66$$

Balok Anak bentang L = 500 cm (As B-C)

Momen inersia penampang T :

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h^3 \times k = \frac{1}{12} \times 25 \times 40^3 \times 1,66 = 221333,33 \text{ cm}^4$$

Momen inersia pelat :

$$I_p = \frac{1}{12} \times L \times h_f^3 = \frac{1}{12} \times 500 \times 12^3 = 72000,00 \text{ cm}^4$$

Mutu beton (f_c') yang digunakan ialah 35 Mpa, Sehingga rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$E_{cb} = E_{cp} = 4700 \sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57 \text{ Mpa}$$

Sehingga rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$\alpha_{fm3} = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cp} \times I_p} = \frac{27805,57 \times 221333,33}{27805,57 \times 72000,00} = 3,07 > 1 \text{ (OK)}$$

Balok Anak bentang L = 250 cm (As B-B')

Momen inersia penampang T :

$$I_b = \frac{1}{12} \times b_w \times h^3 \times k = \frac{1}{12} \times 25 \times 40^3 \times 1,66 = 221333,33 \text{ cm}^4$$

Momen inersia pelat :

$$I_p = \frac{1}{12} \times L \times h_f^3 = \frac{1}{12} \times 250 \times 12^3 = 36000,00 \text{ cm}^4$$

Mutu beton yang digunakan ialah (f_c') 35 Mpa, sehingga :

$$E_{cb} = E_{cp} = 4700 \sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57 \text{ Mpa}$$

Sehingga rasio kekakuan terhadap pelat adalah :

$$\alpha_{fm4} = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cp} \times I_p} = \frac{27805,57 \times 221333,33}{27805,57 \times 36000,00} = 6,15 > 1$$

Dari keempat balok diatas diperoleh nilai rata-rata α_{fm} adalah :

$$\alpha_{fm} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{4} = \frac{13,35 + 26,70 + 3,07 + 6,15}{4} = 12,32$$

Dikarenakan $\alpha_{fm} > 2$, maka untuk menentukan ketebalan pelat digunakan persamaan seperti pada **SNI 2847:2019** Pasal 8.3.1.2 d dan tidak boleh kurang dari 90 mm.

$$h = \frac{\ln\left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36+9\beta} = \frac{500\left(0,8 + \frac{280}{1400}\right)}{36+9(2,00)} = 9,26 > 9 \text{ cm}$$

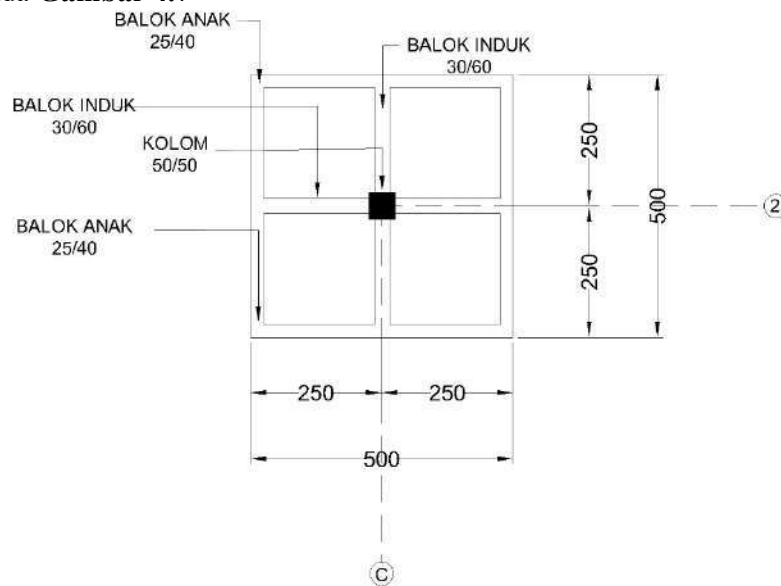
Karena tebal minimum $> 90 \text{ mm}$, maka tebal pelat yang dipakai adalah tebal pelat lantai yang direncanakan $h_{rencana} = 120 \text{ mm} > h_{min} = 92,6 \text{ mm}$ (OK)

4.4. Perencanaan Dimensi Kolom

Perencanaan awal dimensi kolom menggunakan cara *tributary area* yaitu pembebanan kolom seperti beban pelat dan balok yang tidak dipukul seluruhnya, melainkan hanya separuh bentang. Diasumsikan bahwa beban pada balok sama pada setiap lantainya. Perencanaan dimensi kolom pada gedung apartemen Az-zahr harus sesuai dengan syarat **SNI 2847:2019** pasal 18.7.2.1 :

1. Dimensi penampang terkecil, diukur pada garis lurus yang melalui pusat geometri $b_w < 300 \text{ mm}$.
2. Rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus $b_w/h > 0,4$.

Pembebanan yang digunakan pada perencanaan kolom ini sesuai dengan **SNI 1727:2020** yaitu $1,2 D + 1,6 L + 0,5$. Direncanakan kolom pada lantai dasar, asumsi dimensi awal penampang yaitu $50 \times 50 \text{ cm}$. Perhitungan dimensi kolom diambil area yang paling luas dapat dilihat pada **Gambar 4.7**



Gambar 4. 5 Tributery area Kolom

4.4.1. Pembebanan Pada Kolom

Beban pada perencanaan awal dimensi kolom yang dihitung meliputi beban mati (*Dead Load*) dan beban hidup (*Live Load*) dari beban pelat.

➤ Pelat Atap

Beban Mati (*Dead Load*)

Beban Mati Pada Pelat Atap

Pelat	$= 0,10 \times 5 \times 5 \times 2400$	$= 6000 \text{ Kg}$
Balok Induk (BI) X	$= 0,30 \times 0,60 \times 5 \times 1 \times 2400$	$= 2160 \text{ Kg}$
Balok Induk (BI) Y	$= 0,30 \times 0,60 \times 5 \times 1 \times 2400$	$= 2160 \text{ Kg}$
Balok Anak (BA) X	$= 0,25 \times 0,40 \times 5 \times 1 \times 2400$	$= 1200 \text{ Kg}$
Balok Anak (BA) Y	$= 0,25 \times 0,40 \times 5 \times 1 \times 2400$	$= 1200 \text{ Kg}$
Instalasi + Ducting	$= 5 \times 5 \times 50$	$= 1250 \text{ Kg}$
Plafon + Penggantung	$= 5 \times 5 \times 18$	$= 450 \text{ Kg}$
Aspal (1cm)	$= 5 \times 5 \times 1 \times 14$	$= 350 \text{ Kg}$
Spesi (2cm)	$= 5 \times 5 \times 2 \times 21$	$= 1050 \text{ Kg}$
Finishing (1cm)	$= 5 \times 5 \times 5 \times 1 \times 21$	$= 525 \text{ Kg} +$

Total Beban Mati (QDL) Atap = 16345 Kg

Beban Hidup (*Live Load*)

Sesuai SNI 1727 : 2020 pasal 4.3-1 beban hidup pada bagian atap struktur gedung adalah $4,79 \text{ kN/m}^2 = 479 \text{ kg/m}^2$.

Beban Air Hujan (A atau R)

Beban air hujan didapat dari SNI 1727:2020 Pasal 8.3. ialah sebagai berikut :

$$R = 0,0098 \times (ds + dh)$$

Dengan mengasumsikan kedalaman air pada atap (ds) ialah 15 mm, dan tambahan untuk kedalaman air pada atap diatas lubang drainase (dh) ialah 10 mm, maka untuk beban air hujan (qR) diperoleh :

$$\begin{aligned} R &= 0,0098 \times (ds + dh) \\ &= 0,0098 \times (15 + 10) \\ &= 0,245 \text{ kN/m}^2 \\ &= 24,50 \text{ Kg/m}^2 \end{aligned}$$

Total beban kombinasi pada atap = $1,2 D + 1,6 L + 0,5 L_r$

$$q_U \text{ atap} = 1,2 (16345) + 1,6 (479) + 0,5 (24,5)$$

$$= 20392,65 \text{ Kg}$$

$$= 203926,5 \text{ N}$$

➤ **Pelat Lantai**

Beban Mati (Dead Load)

Beban Mati Pada Pelat Lantai

Pelat	$= 0,12 \times 5 \times 5 \times 2400$	$= 7200$	Kg
Balok Induk (BI) X	$= 0,30 \times 0,60 \times 5 \times 1 \times 2400$	$= 2160$	Kg
Balok Induk (BI) Y	$= 0,30 \times 0,60 \times 5 \times 1 \times 2400$	$= 2160$	Kg
Balok Anak (BA) X	$= 0,25 \times 0,40 \times 5 \times 1 \times 2400$	$= 1200$	Kg
Balok Anak (BA) Y	$= 0,25 \times 0,40 \times 5 \times 1 \times 2400$	$= 1200$	Kg
Instalasi + Ducting	$= 5 \times 5 \times 50$	$= 1250$	Kg
Plafon + Penggantung	$= 5 \times 5 \times 18$	$= 450$	Kg
Spesi (2cm)	$= 5 \times 5 \times 2 \times 21$	$= 1050$	Kg
Keramik (2cm)	$= 5 \times 5 \times 2 \times 24$	$= 1200$	Kg
Beban Furniture	$= 5 \times 5 \times 100$	$= 2500$	Kg +
Beban Mati (QDL) Plat Lantai		= 20370	Kg

$$\text{Total beban mati (Dead Load)} = Q_d \text{ plat lantai (9)}$$

$$= 20370 \times 9$$

$$= 183330 \text{ kg}$$

Beban Hidup (Live Load)

Sesuai SNI 1727 : 2020 tabel 4.3-1 beban hidup pada bagian lantai struktur gedung adalah sebesar $1,92 \text{ kN/m}^2 = 192 \text{ kg/m}^2$

$$\text{Total beban hidup (Live Load)} = Q_L \text{ plat lantai (9)}$$

$$= 192 \times 9$$

$$= 1728 \text{ kg}$$

Total Beban Kombinasi Pada Kolom

$$P_u \text{ Total} = 1,2 D + 1,6 L$$

$$= 1,2 (183330) + 1,6 (1728)$$

$$= 222760,00 \text{ Kg}$$

$$= 2227600 \text{ N}$$

4.4.2. Menentukan Dimensi Pada Kolom

$$\text{Faktor reduksi kekuatan } (\Phi) = 0,3$$

$$\text{Mutu beton } (f_c') = 35 \text{ Mpa}$$

$$\text{Dimensi (A)} = \frac{qU}{\Phi \times f_c'} = \frac{2227600}{0,3 \times 35} = 212152,38 \text{ mm}^2$$

Kolom berbentuk segi empat, maka $A = b^2$

$$b^2 = 212152,38$$

$$b^2 = \sqrt{212152,38} = 460,600 \text{ mm} \approx 461 \text{ mm} = 46 \text{ cm}$$

Maka dimensi kolom yang dipakai adalah 50 x 50 cm

Kesimpulan *Preliminary Design*, diperoleh :

$$\text{Dimensi balok induk (BI)} = 30 \times 60 \text{ cm}$$

$$\text{Dimensi balok anak (BA)} = 25 \text{ cx } 40 \text{ cm}$$

$$\text{Dimensi kolom} = 50 \times 50 \text{ cm}$$

$$\text{Tebal pelat atap} = 10 \text{ cm}$$

$$\text{Tebal pelat lantai} = 12 \text{ cm}$$

4.5. Pemodelan Awal Pada *BIM*

Setelah diperoleh hasil *preliminary design* dari elemen struktur utama, tahap selanjutnya adalah melakukan pemodelan awal bangunan ke dalam sistem *Building Information Modeling (BIM)*. Pemodelan ini bertujuan untuk merepresentasikan hasil perencanaan awal dalam bentuk model tiga dimensi yang terintegrasi, sehingga susunan elemen struktur seperti kolom, balok, dan pelat dapat divisualisasikan secara utuh sebelum dilakukan analisis lanjutan. Pada tahap ini, model disusun berdasarkan data dimensi hasil perhitungan awal, konfigurasi grid, serta elevasi tiap lantai yang telah direncanakan sebelumnya. Dengan demikian, model *BIM* awal menjadi dasar dalam proses evaluasi, revisi desain, dan analisis struktur pada tahap berikutnya. Alur ini sesuai dengan metode perencanaan yang menempatkan pemodelan *BIM* setelah *preliminary design* dan sebelum iterasi revisi serta verifikasi struktur.

4.5.1. Persiapan Data Pemodelan

Tahap persiapan data pemodelan dilakukan untuk menghimpun seluruh hasil *preliminary design* yang akan digunakan sebagai dasar penyusunan model struktur dalam *BIM*. Data yang disiapkan meliputi dimensi awal elemen struktur utama, yaitu balok, kolom, dan pelat, serta data pendukung berupa tinggi antar lantai, jumlah lantai, konfigurasi grid bangunan, dan mutu material yang digunakan. Seluruh data tersebut

disusun secara sistematis agar proses pemodelan dapat dilakukan sesuai dengan hasil perencanaan awal yang telah diperoleh sebelumnya.

Tabel 4. 1 Data Pemodelan

No	Parameter	Nilai
1	Jumlah lantai	10 lantai
2	Tinggi lantai dasar	4,5 meter
3	Tinggi lantai 2-10	4 meter
4	Dimensi Kolom	50 x 50 cm
5	Dimensi balok induk	30 x 60 cm
6	Dimensi balok anak	25 x 40 cm
7	Tebal plat lantai	12 cm
8	Tebal plat atap	10 cm
9	Mutu beton (f_c')	35 MPa
10	Mutu Baja (f_y)	420 MPa

Maksud dari penyajian Tabel 4.1 adalah untuk mendokumentasikan variabel-variabel geometris dan material hasil *preliminary design* yang akan diimplementasikan ke dalam perangkat lunak *BIM*. Rincian dimensi balok induk, balok anak, serta variasi tebal pelat disusun sedemikian rupa agar proses pemodelan elemen struktur dapat dilakukan secara konsisten. Selain dimensi, tabel ini juga menetapkan batasan mutu material sesuai regulasi **SNI 2847:2019**. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa model digital yang dibangun tidak hanya akurat secara visual, tetapi juga memiliki properti teknis yang valid untuk tahap analisis beban berdasarkan **SNI 1727:2020**.

4.5.2. Pembuatan Level dan Grid Bangunan

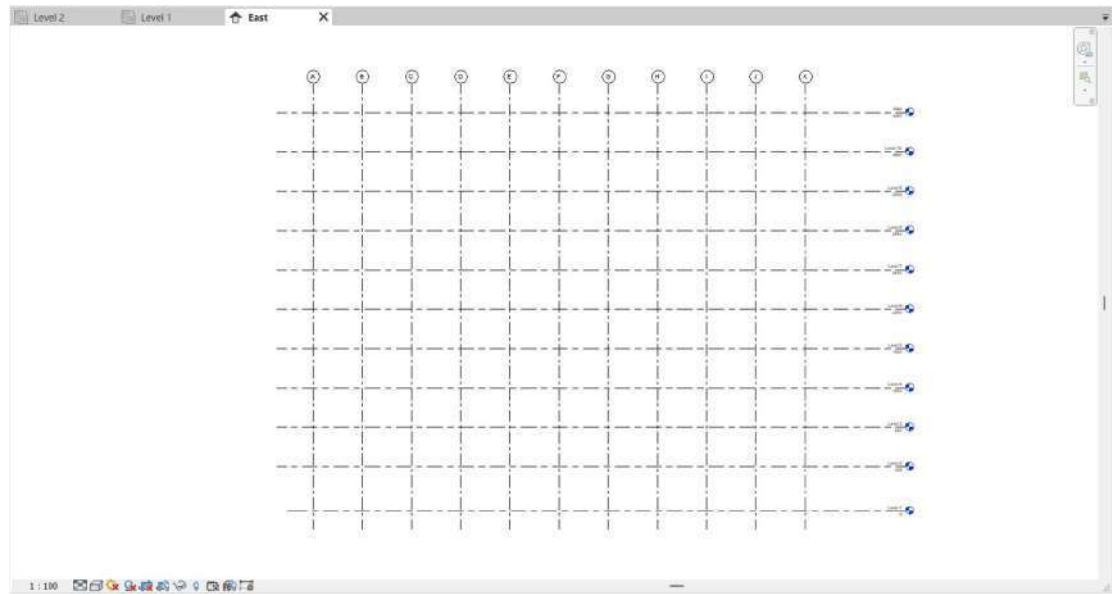
Setelah data pemodelan disiapkan, dilakukan penyusunan level dan grid pada *BIM*. Level sebagai acuan elevasi, sedangkan grid menentukan posisi elemen struktur.

Tabel 4. 2 Level bangunan pada model *BIM*

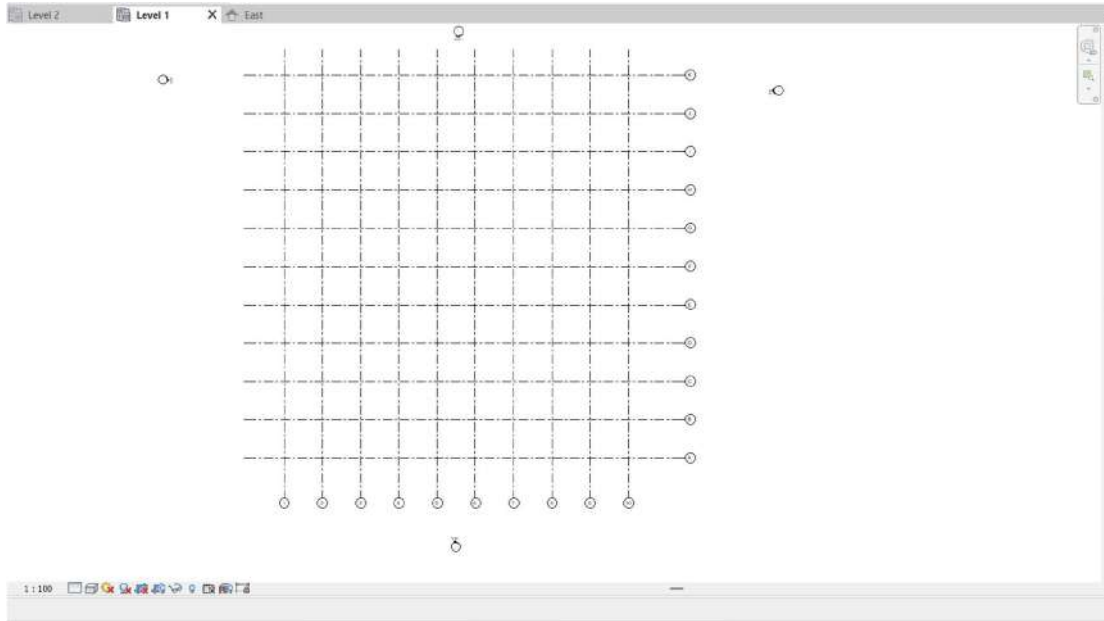
No	Level	Elevasi (m)
1	Lantai 1	0,00
2	Lantai 2	4,50
3	Lantai 3	8,50

4	Lantai 4	12,50
5	Lantai 5	16,50
6	Lantai 6	20,50
7	Lantai 7	24,50
8	Lantai 8	28,50
9	Lantai 9	32,50
10	Lantai 10	34,50

Pada Tabel 4.2 menyajikan rincian level bangunan yang menjadi batasan elevasi dalam pemodelan struktur. Elevasi ini berfungsi sebagai acuan vertikal agar penempatan elemen struktur seperti pelat dan balok sesuai dengan perencanaan tinggi antar lantai yang telah ditetapkan. Hal ini berhubungan erat dengan akurasi perhitungan beban gravitasi yang bekerja pada struktur.



Gambar 4. 6 Pemodelan Level



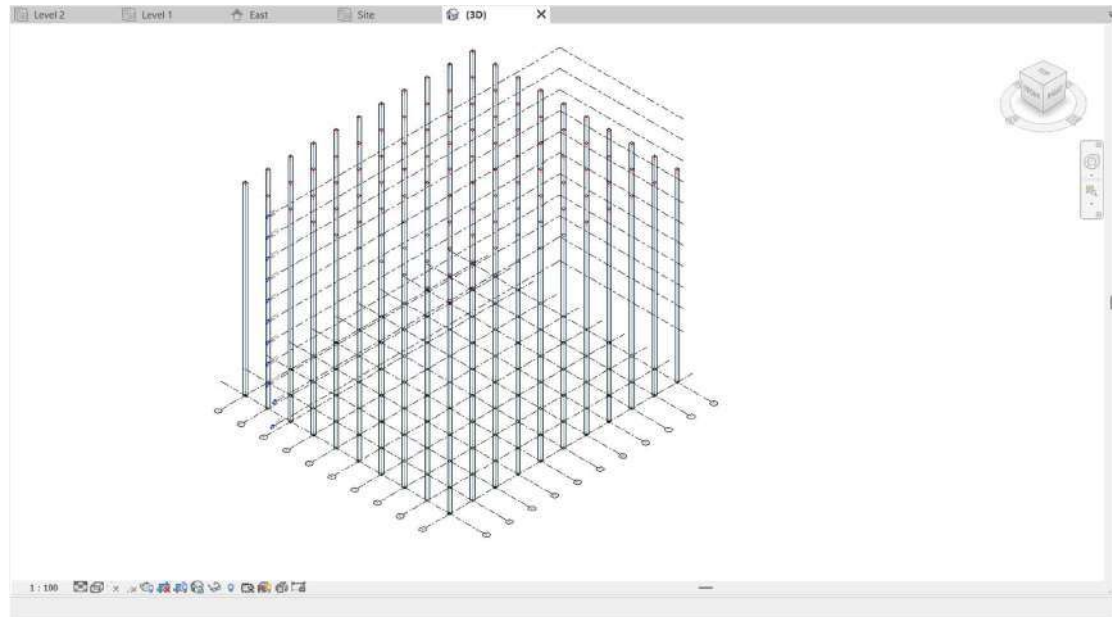
Gambar 4. 7 Pemodelan Grid

Representasi visual dari kerangka kerja digital ini dapat dilihat pada Gambar 4.6 (Pemodelan Level) dan Gambar 4.7 (Pemodelan Grid). Tahap pembuatan level dan *grid* merupakan langkah awal yang paling fundamental dalam alur kerja *BIM*. Koordinat yang dihasilkan dari perpotongan antar *grid* memastikan bahwa setiap elemen struktur utama, seperti kolom SRPMK yang direncanakan, berada pada titik yang tepat sehingga memudahkan proses analisis distribusi gaya dalam maupun validasi model 3D di tahap selanjutnya sesuai standar SNI 2847:2019.

4.5.3. Pemodelan Kolom

Pemodelan kolom dilakukan setelah level dan grid bangunan selesai dibuat. Kolom dimodelkan pada titik perpotongan grid dengan dimensi 50×50 cm sesuai dengan hasil preliminary design yang telah ditentukan sebelumnya. Sebagai elemen vertikal utama, kolom berfungsi menerima beban dari balok dan pelat untuk kemudian diteruskan ke struktur bawah. Oleh karena itu, penempatan kolom dalam model *BIM* harus dilakukan

dengan tepat agar sesuai dengan konfigurasi struktur yang direncanakan.

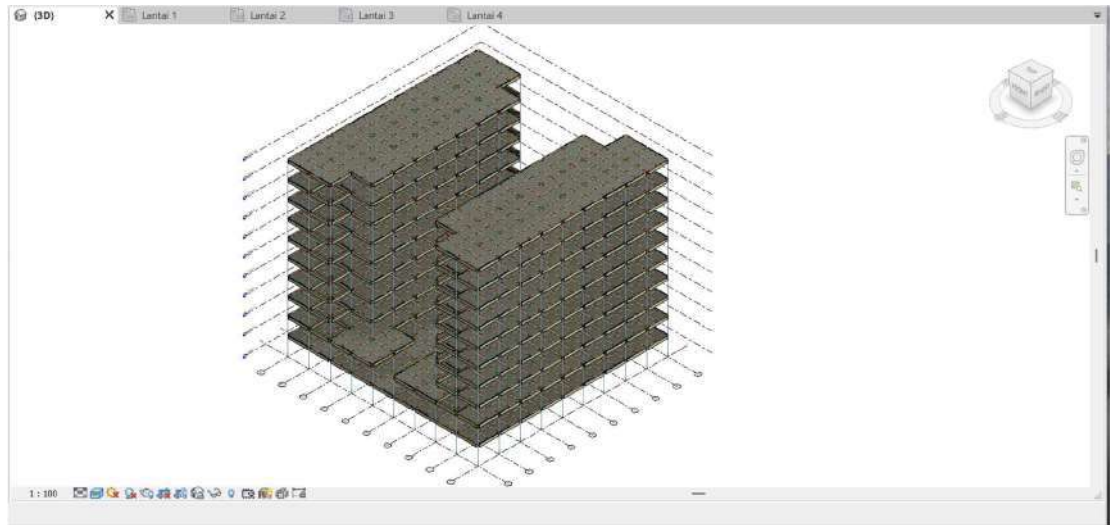


Gambar 4. 8 Pemodelan Kolom

Hasil pemodelan kolom pada *BIM* ditampilkan pada Gambar 4.8. Pada tahap ini, kolom juga dibuat secara parametrik sehingga perubahan ukuran atau posisi dapat dilakukan dengan lebih mudah pada tahap revisi berikutnya.

4.5.4. Pemodelan Balok

Setelah kolom selesai dimodelkan, langkah selanjutnya adalah pemodelan balok. Balok yang dimodelkan terdiri dari balok induk dengan dimensi 30×60 cm dan balok anak dengan dimensi 25×40 cm sesuai hasil *preliminary design*. Balok berfungsi sebagai elemen penghubung antar kolom sekaligus penerima beban dari pelat lantai sebelum disalurkan ke kolom. Pada pemodelan awal ini, balok ditempatkan pada bentang-bentang yang telah ditentukan sesuai dengan grid struktur, sehingga keterkaitan antar elemen dapat tergambar secara utuh dalam model tiga dimensi.



Gambar 4. 9 Pemodelan Balok dan Plat

Hasil pemodelan balok pada *BIM* ditampilkan pada Gambar 4.9. Pemodelan balok yang dilakukan secara parametrik juga memudahkan penyesuaian apabila pada tahap analisis ditemukan kebutuhan revisi dimensi.

4.5.5. Pemodelan Pelat Lantai

Pemodelan pelat lantai dilakukan setelah elemen kolom dan balok terbentuk. Pelat lantai dan pelat atap dimodelkan dengan tebal masing-masing 12 cm sesuai dengan hasil *preliminary design*, serta ditempatkan pada bidang lantai yang telah dibatasi oleh sistem balok. Dalam struktur gedung, pelat berfungsi menerima beban mati dan beban hidup dari aktivitas bangunan, kemudian menyalurkannya ke balok dan kolom. Oleh karena itu, pelat menjadi bagian penting dalam pembentukan sistem struktur yang utuh. Hasil pemodelan pelat lantai pada *BIM* ditampilkan pada Gambar 4.9. Pemodelan pelat pada *BIM* memungkinkan bentuk struktur lantai tergambar dengan lebih jelas dan menjadi dasar bagi analisis struktur pada tahap selanjutnya.

4.5.6. Penerapan Parameter *BIM*

Pada tahap ini, setiap elemen struktur diberi parameter sesuai dengan hasil perencanaan awal. Parameter yang diterapkan meliputi dimensi penampang, seperti kolom 50×50 cm, balok induk 30×60 cm, balok anak 25×40 cm, serta tebal pelat 12 cm, selain mutu material, level penempatan, dan identitas masing-masing elemen struktur.

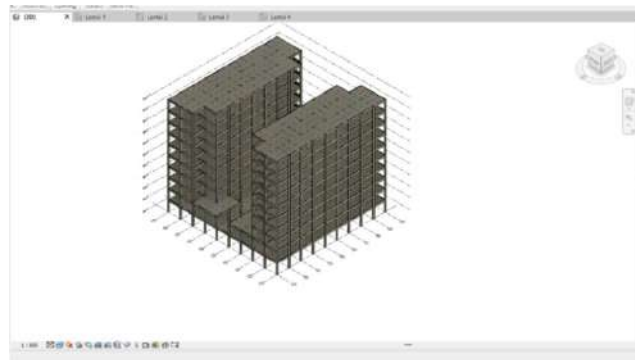
Tabel 4. 3 Parameter Elemen Struktur Pada Model *BIM*

No	Elemen Struktur	Dimensi	Material	Level
1	Kolom	50 x 50 cm	Mutu Beton $f'c = 35$ MPa	Lantai 1 - 10
2	Balok Induk	30 x 60 cm	Mutu Beton $f'c = 35$ MPa	Tiap lantai
3	Balok Anak	25 x 40 cm	Mutu Beton $f'c = 35$ MPa	Tiap lantai
4	Pelat Lantai	t = 12 cm	Mutu Beton $f'c = 35$ MPa	Lantai 1 - 9
5	Pelat Atap	t = 10 cm	Mutu Beton $f'c = 35$ MPa	Atap

Parameter elemen struktur yang digunakan dalam model *BIM* disajikan pada Tabel 4.3. Pemberian parameter dilakukan agar model memiliki sifat parametrik, sehingga perubahan pada satu elemen dapat diperbarui secara lebih efisien tanpa harus menggambar ulang keseluruhan model. Karakteristik ini menjadi salah satu keunggulan utama *BIM* karena mendukung proses revisi desain yang lebih cepat, akurat, dan terintegrasi. Dengan penerapan parameter tersebut, model awal tidak hanya berfungsi sebagai representasi visual, tetapi juga sebagai basis data struktur yang dapat digunakan pada tahap analisis berikutnya.

4.5.7. Hasil Model Awal

Hasil dari pemodelan awal pada *BIM* berupa model tiga dimensi struktur gedung Apartemen “Az-Zahr” yang telah tersusun berdasarkan hasil *preliminary design* dengan dimensi elemen utama, yaitu kolom 50×50 cm, balok induk 30×60 cm, balok anak 25×40 cm, serta pelat lantai dan pelat atap setebal 12 cm.



Gambar 4. 10 Model awal Pada *BIM*

Model awal ini memperlihatkan hubungan antar elemen struktur utama, yaitu kolom, balok, dan pelat, secara keseluruhan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.10. Model tersebut dapat digunakan sebagai dasar untuk proses evaluasi dan revisi desain. Dengan

adanya model awal, analisis struktur dapat dilakukan secara lebih terarah karena kondisi geometri bangunan telah direpresentasikan secara digital. Model ini selanjutnya menjadi dasar dalam iterasi revisi desain, analisis beban gempa, verifikasi simpangan antar lantai, serta detailing sambungan kolom-balok pada tahap berikutnya.

4.6. Rekapitulasi Model Awal

Rekapitulasi model awal disusun untuk merangkum hasil pemodelan struktur yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya ke dalam bentuk data teknis yang lebih sistematis. Rekapitulasi ini mencakup informasi mengenai dimensi elemen struktur utama, konfigurasi geometri bangunan, mutu material, serta jumlah elemen yang telah dimodelkan pada tahap awal. Penyajian data dalam bentuk rekapitulasi diperlukan agar karakteristik model awal dapat diketahui secara lebih jelas dan menjadi acuan dalam proses evaluasi, revisi desain, dan analisis struktur pada tahap selanjutnya.

4.6.1. Rekapitulasi Dimensi Elemen Struktur Awal

Rekapitulasi dimensi elemen struktur awal disajikan pada **Tabel 4.4** untuk memberikan gambaran mengenai ukuran awal elemen utama yang digunakan dalam model *BIM*. Data yang dirangkum meliputi dimensi balok, kolom, dan pelat yang diperoleh dari hasil preliminary design. Rekapitulasi ini menunjukkan bahwa ukuran elemen yang dimasukkan ke dalam model telah disesuaikan dengan hasil perhitungan awal dan akan menjadi dasar dalam proses revisi apabila ditemukan ketidaksesuaian pada tahap analisis berikutnya.

Tabel 4. 4 Rekapitulasi Elemen Struktur

No	Parameter	Nilai
1	Jumlah lantai	10 lantai
2	Tinggi lantai dasar	4,5 meter
3	Tinggi lantai 2-10	4 meter
4	Dimensi Kolom	50 x 50 cm
5	Dimensi balok induk	30 x 60 cm
6	Dimensi balok anak	25 x 40 cm
7	Tebal plat lantai	12 cm
8	Tebal plat atap	12 cm

9	Mutu beton (f'_c)	35 MPa
10	Mutu Baja (f_y)	420 MPa

Penyajian Tabel 4.4 bertujuan untuk merangkum seluruh dimensi elemen struktur utama yang dihasilkan dari perhitungan desain awal (preliminary design). Penentuan dimensi balok induk (30x60 cm), balok anak (25x40 cm), dan kolom (50x50 cm) telah mempertimbangkan batas minimum kekakuan guna mengontrol lendutan sesuai SNI 2847:2019. Data ini menjadi parameter geometri tetap dalam model *BIM*, sehingga jika pada tahap analisis kekuatan ditemukan ketidakmampuan penampang dalam memikul beban, tabel ini akan menjadi acuan dasar untuk melakukan revisi dimensi secara konsisten pada seluruh model struktur.

4.6.2. Rekapitulasi Material Struktur

Rekapitulasi material struktur disusun pada **Tabel 4.5** untuk merangkum mutu material yang digunakan pada model awal. Material yang dicantumkan meliputi mutu beton dan mutu baja tulangan yang menjadi dasar dalam perencanaan elemen struktur utama. Penyusunan rekapitulasi ini diperlukan agar parameter material yang digunakan dalam model *BIM* terdokumentasi dengan baik dan dapat digunakan secara konsisten pada proses analisis berikutnya.

Tabel 4. 5 Rekapitulasi Material Struktur

No	Material	Mutu
1	Beton	$f'_c = 35$ MPa
2	Baja tulangan	$f_y = 420$ MPa

Maksud dari Tabel 4.6 adalah untuk mendefinisikan properti mekanik material yang digunakan dalam perencanaan gedung. Penggunaan beton dengan kuat tekan $f'_c = 35$ MPa dan baja tulangan dengan kuat leleh $f_y = 420$ MPa dipilih untuk memenuhi persyaratan kekuatan dan daktilitas, khususnya pada sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK). Konsistensi penggunaan mutu material ini sangat krusial dalam perangkat lunak *BIM* dan analisis struktur, karena akan memengaruhi perhitungan kapasitas nominal penampang serta perilaku struktur saat menerima beban gempa rencana berdasarkan SNI 1727:2020.

4.6.3. Rekapitulasi Geometri Model Awal

Rekapitulasi geometri model awal disajikan pada **Tabel 4.6** untuk menunjukkan konfigurasi bangunan yang telah dimodelkan dalam *BIM*. Data yang dirangkum meliputi jumlah lantai, tinggi antar lantai, tinggi bangunan, serta konfigurasi grid struktur yang digunakan sebagai dasar penempatan elemen. Rekapitulasi ini diperlukan untuk memastikan bahwa model awal telah merepresentasikan kondisi bangunan yang direncanakan secara geometris.

Tabel 4. 6 Rekapitulasi Geometri Model Awal

No	Parameter Geometri	Nilai
1	Jumlah Lantai	10 Lantai
2	Tinggi lantai dasar	4,5 m
3	Tinggi Antar Lantai	4,0 m
4	Tinggi bangunan	40 m

Pada Tabel 4.7 merangkum parameter geometri makro bangunan yang mencakup jumlah lantai dan total ketinggian struktur. Informasi ketinggian bangunan sebesar 40 meter merupakan variabel kunci yang akan digunakan dalam perhitungan periode fundamental struktur dan gaya geser dasar seismik menurut **SNI 1727:2020**. Rekapitulasi ini memastikan bahwa konfigurasi vertikal gedung telah terintegrasi dengan benar antara koordinat level pada model *BIM* dengan asumsi perhitungan beban gempa yang akan dilakukan pada tahap berikutnya.

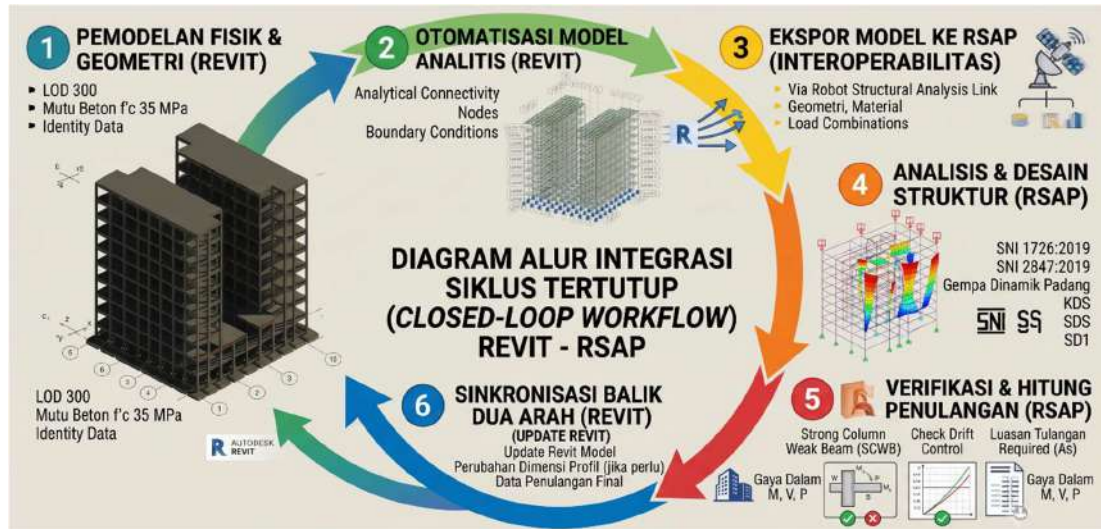
BAB V

IMPLEMENTASI PARAMETRIK DAN INTEROPERABILITAS

5.1. Alur Kerja (Workflow) Perencanaan Berbasis BIM

Perencanaan struktur Gedung Apartemen "Az-Zahr" di Kota Padang ini menerapkan metodologi *Building Information Modeling (BIM)* yang mengintegrasikan proses pemodelan parametrik 3D dengan analisis elemen hingga secara sirkular (*closed-loop design*). Berbeda dengan metode konvensional yang memisahkan antara proses penggambaran (2D CAD) dan pemodelan analitis struktur (*Software* rekayasa terpisah), ekosistem *BIM* dalam penelitian ini memanfaatkan interoperabilitas langsung (live-link) antara Autodesk Revit sebagai *BIM* Authoring Tool dan Robot Structural Analysis Professional (RSAP) sebagai *BIM* Calculation Tool.

Alur kerja (workflow) integrasi dua arah (bi-directional synchronization) yang diterapkan dalam perancangan struktur gedung 10 lantai ini dibagi menjadi 6 (enam) tahapan utama yang saling berkesinambungan membentuk siklus tertutup, seperti yang disajikan pada Gambar 5.1 berikut:



Gambar 5.1 Diagram Alur Integrasi Siklus Tertutup (*Closed-Loop Workflow*) Revit – RSAP

5.1.1 Pemodelan Fisik dan Geometri Struktur (Autodesk Revit)

Proses diawali dengan membangun model digital struktur secara parametrik di Autodesk Revit yang difokuskan pada pemenuhan kualifikasi *Level of Development (LOD)*

300. Pada tahap ini, seluruh elemen fisik gedung seperti kolom, balok, pelat lantai, dan komponen struktur utama lainnya dimodelkan secara riil sesuai dengan dimensi penampang rencana, elevasi level lantai, dan sistem grid koordinat global. Selain informasi geometris, setiap elemen diinjeksi dengan data non-geometris melalui fitur *Identity Data*, salah satunya adalah spesifikasi material mutu beton penampang sebesar $f'_c = 35$ MPa.

5.1.2 Otomatisasi Model Analitis (Autodesk Revit)

Secara simultan bersamaan dengan pembuatan model fisik 3D, Autodesk Revit secara otomatis menggenerasi model analitis (*analytical model*) yang terdiri dari elemen garis batang (*analytical lines*) dan elemen luasan (*analytical surfaces*). Sebelum proses transfer data dilakukan, dilakukan tahapan verifikasi terhadap kebersambungan model analitis (*analytical connectivity*) untuk memastikan seluruh titik simpul (*nodes*) antar-elemen saling bertemu secara presisi serta mendefinisikan kondisi tumpuan awal (*boundary conditions*) pada dasar bangunan.

5.1.3 Interoperabilitas Ekspor Model ke RSAP

Model analitis yang telah tervalidasi di Autodesk Revit kemudian diekspor menuju *Software* analisis struktur melalui *Robot Structural Analysis Link*. Proses interoperabilitas ini bekerja secara langsung (*direct mapping*), di mana seluruh informasi krusial berupa geometri struktur, orientasi penampang, data material ($f'_c = 35$ MPa), koordinat *nodes*, hingga parameter kombinasi pembebanan awal (*load combinations*) dipindahkan secara utuh tanpa memerlukan proses pemodelan ulang dari awal di *Software* analisis.

5.1.4 Analisis & Desain Struktur (RSAP)

Model elemen hingga (Finite Element Method) yang telah diterima di dalam lingkungan RSAP kemudian diposisikan untuk menerima beban lateral gempa dinamik Kota Padang sesuai parameter ketetapan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Evaluasi perilaku struktur akibat kombinasi pembebanan gempa dilakukan secara komprehensif dengan meninjau parameter KDS, SS, S1, SDS, dan SD1.

5.1.5 Verifikasi & Perhitungan Penulangan (RSAP)

Pada tahapan kalkulasi internal RSAP, dilakukan serangkaian pengecekan pemenuhan syarat Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Parameter kritis yang dikontrol meliputi kontrol simpangan antar-lantai (*drift control*) serta verifikasi kapasitas Strong Column Weak Beam (SCWB) pada setiap sambungan balok-kolom kritis guna mengekstrak luasan kebutuhan tulangan perlunya (A_s) Seluruh *Output* gaya dalam (M, V, P) beserta tabel

hasil analisis ini dapat diekspor langsung ke format Microsoft Excel (*spreadSheet*) untuk kebutuhan validasi laporan.

5.1.6 Sinkronisasi Balik Dua Arah (Revit)

Tahap akhir merupakan proses validasi penutup di mana apabila terjadi perubahan dimensi penampang elemen akibat kontrol simpangan di RSAP, perubahan tersebut ditransfer kembali ke Autodesk Revit melalui fitur *Bi-Directional Update*. Sinkronisasi dua arah ini menginstruksikan database Revit untuk secara otomatis memperbarui model fisik 3D, dokumen gambar kerja, beserta data penulangan final secara *real-time*.

5.2 Penerapan Elemen Parametrik dan *Level of Development (LOD) 300*

Dalam implementasi *Building Information Modeling (BIM)* pada struktur Gedung Apartemen "Az-Zahr", pemodelan objek tidak lagi berbasis garis atau bidang 2D (*drafting-oriented*), melainkan berbasis objek cerdas (*object-oriented*) yang bersifat parametrik. Sifat parametrik ini berarti setiap elemen struktur baik kolom, balok, maupun pelat lantai memiliki parameter dimensi (*width, height, length*) dan database properti material terintegrasi yang saling terikat secara matematis di dalam ekosistem Autodesk Revit. Jika salah satu parameter dimensi diubah, seluruh visualisasi objek terkait, elevasi volume, dan dokumen grafis turunannya akan menyesuaikan secara otomatis.

Untuk memberikan kontribusi ilmiah yang membedakan skripsi ini dengan perencanaan beton konvensional, tingkat kedalaman visual dan akurasi informasi model digital (*BIM Model*) dikontrol ketat berdasarkan standar internasional *BIM Forum Specification* untuk *Level of Development (LOD) 300*. Penetapan standar LOD 300 pada perancangan komponen beton bertulang tahan gempa di wilayah Kota Padang ini mendefinisikan bahwa elemen pemodelan struktur harus dapat diidentifikasi secara spesifik dan dihitung kuantitasnya secara riil di dalam database. Dalam penerapannya, kedalaman data model struktur Gedung Apartemen "Az-Zahr" ini mengacu pada kriteria LOD 300 yang menitikberatkan pada dua parameter utama, yaitu:

1. Detail Geometri: Dimensi penampang, posisi grid koordinat, hingga elevasi level lantai untuk kolom, balok, dan pelat dimodelkan secara presisi sesuai rencana dimensi awal (*preliminary design*).
2. Informasi Atribut (Non-Geometris): Setiap komponen digital tidak hanya berupa objek visual, tetapi juga ditanami data teknis penunjang pada *Identity Data* materialnya,

seperti mutu beton struktur ($f'_c = 35 \text{ MPa}$), fungsi elemen, dan parameter beban analitisnya.

Sebagai bukti konkret penyerapan metode *BIM* dalam pengerjaan Tugas Akhir ini sekaligus mempertegas bahwa pemodelan 3D yang dilakukan memiliki basis data teknis yang valid untuk dianalisis rincian parameter capaian LOD 300 disajikan secara terstruktur dalam matriks pada Tabel 5.1.

Tabel 5. 1 *Level Of Development*

Elemen Struktur	Komponen Geometri (3D)	Atribut Data (Non-Geometris)	<i>Output</i> / Bukti Nyata pada Model	Capaian
Kolom Utama (K1)	Dimensi penampang riil (800 x 800 mm), grid koordinat, elevasi <i>top/bottom</i> lantai 1–10.	Mutu beton $f'_c = 35 \text{ MPa}$	Letak elemen 3D presisi pada koordinat ruang, garis analitis otomatis terbentuk tepat di as grid untuk mendeteksi <i>joint</i> kritis.	LOD 300
Balok Induk (B1)	Ukuran penampang (400 x 700 mm), panjang bentang bersih, posisi elevasi muka atas balok.	Mutu beton $f'_c = 35 \text{ MPa}$	Elemen pemodelan mengunci posisi lantai secara presisi, distribusi beban pelat ke balok langsung terpetakan pada model analitis.	LOD 300

5.3. Analisis Interoperabilitas Dua Arah (*Bi-Directional Synchronization*)

Poin utama dari integrasi *BIM* pada Tugas Akhir ini adalah pemanfaatan fitur pertukaran data dua arah (bi-directional synchronization) antara Autodesk Revit dan Robot Structural Analysis Professional (RSAP). Proses interoperabilitas ini berjalan langsung lewat

fitur Robot Structural Analysis Link bawaan tanpa perlu diekspor dulu ke format pihak ketiga (seperti .dxf atau .ifc). Dengan cara ini, risiko adanya error geometri atau hilangnya properti material saat model berpindah *Software* bisa diminimalisir.

Proses sinkronisasi dan transfer parameter teknis ini dibagi menjadi dua tahap utama:

1. Transfer Model Analitis (Revit ke RSAP)

Saat model struktur atas Gedung Az-Zahr dikirim dari Revit ke RSAP, data-data teknis yang otomatis terbaca dan lolos validasi meliputi:

- Geometri dan Koordinat: Garis as elemen batang (analytical lines) untuk kolom dan balok, serta luasan bidang (analytical surfaces) untuk pelat lantai langsung terpetakan pas sesuai koordinat grid bangunan.
- Kondisi Batas (Tumpuan): Defenisi perletakan jepit (fixed support) yang sudah dipasang pada level dasar (fondasi) di Revit langsung diterjemahkan sebagai tumpuan kaku di RSAP.
- Karakteristik Material: Properti mekanis beton dengan mutu $f'_c = 35$ MPa (seperti modulus elastisitas dan Poisson's ratio) langsung melekat pada penampang tanpa perlu di *Input* ulang secara manual di RSAP.

2. Sinkronisasi Balik Hasil Evaluasi (RSAP ke Revit)

Setelah model menerima beban gempa dinamik Kota Padang di RSAP, dilakukan pengecekan kinerja struktur sesuai aturan SRPMK pada SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Proses interoperabilitas balik ditunjukkan lewat mekanisme berikut:

- *Update* Dimensi Akibat Evaluasi Struktur: Jika dimensi awal (preliminary design) kolom utama (800 x 800 mm) atau balok induk (400 x 700mm) ternyata tidak memenuhi batas simpangan antar-lantai (drift control) atau syarat Strong Column Weak Beam (SCWB), perubahan ukuran penampang penentu langsung diganti di dalam RSAP.
- Eksekusi *Update* Model: Melalui perintah *Update* Model, RSAP mengirim balik parameter dimensi yang baru ke Revit. Database Revit secara otomatis memperbarui bentuk fisik model 3D beserta seluruh lembar denah dan potongan secara real-time tanpa perlu digambar ulang dari nol (redrafting).
- Penyimpanan Data Analisis: Data luasan kebutuhan tulangan perlunya (As) hasil kalkulasi RSAP akan tertanam pada parameter internal elemen di Revit. Selain itu, rekapitulasi gaya-gaya dalam (M, V, P) dari hasil analisis ini juga bisa langsung

diekspor ke Microsoft Excel untuk keperluan verifikasi atau lampiran data hitungan.

5.4. Evaluasi Komparatif Aktivitas Desain (Konvensional (2D CAD) vs *BIM*)

Untuk membuktikan aspek efisiensi dari implementasi *BIM* dalam Tugas Akhir ini, dilakukan evaluasi komparatif antara metode integrasi *BIM* (Revit–RSAP) dengan metode konvensional yang biasa digunakan (2D CAD + *Software* analisis terpisah). Karena penelitian ini tidak melakukan pengukuran durasi jam kerja secara empiris menggunakan stopwatch di lapangan, indikator efisiensi ditinjau berdasarkan kapabilitas fungsional dan pemangkasan rantai alur kerja (workflow) saat proses perencanaan hingga manajemen revisi terjadi.

Tabel 5. 2 Komparasi Aktivitas Desain Metode Konvensional vs Metode Integrasi *BIM*

No	Aktivitas Perencanaan	Metode Konvensional (2D CAD + <i>Software</i> Analisis Terpisah)	Metode Integrasi <i>BIM</i> (Revit + RSAP)
1.	Pemodelan Struktur	Menggambar garis manual secara terpisah per tampak, denah, dan detail potongan.	Pemodelan berbasis elemen tunggal parametrik (sekali model langsung membentuk visual 3D, denah, dan potongan otomatis).
2.	Transfer Data Analisis	Harus mendefinisikan ulang seluruh geometri, koordinat node, properti material, dan beban dari awal pada <i>Software</i> analisis.	Mentransfer langsung model analitis yang otomatis terbentuk dari Revit ke RSAP tanpa perlu pemodelan ulang (<i>re-modeling</i>).
3.	Manajemen Revisi Desain	Jika dimensi komponen berubah akibat evaluasi gaya dalam, gambar CAD di setiap lembar denah dan detail potongan harus direvisi manual satu per satu.	Menggunakan <i>Bi-Directional Link</i> ; perubahan dimensi penampang di RSAP otomatis memperbarui dokumen

			grafis dan model fisik di Revit secara simultan.
--	--	--	--

Berdasarkan perbandingan kapabilitas aktivitas pada Tabel 5.2, efisiensi penggunaan ekosistem *BIM* (Autodesk Revit – RSAP) pada perencanaan Gedung Apartemen "Az-Zahr" ini dibuktikan secara terukur melalui penyederhanaan rantai proses kerja operasional. Jika merujuk pada studi dokumentasi alur kerja digital terbaru oleh Oktavianus et al. (2024), integrasi berbasis pemodelan parametrik dan koordinasi sirkular diklaim mampu mereduksi siklus revisi berulang secara signifikan berkisar antara 65% hingga 70% jika dibandingkan dengan metode konvensional.

Dalam Tugas Akhir ini, validitas angka reduksi tersebut dibuktikan secara konkret melalui pemangkasan tahapan kerja nyata. Saat terjadi perubahan atau revisi dimensi elemen struktur akibat evaluasi gaya dalam, metode konvensional (AutoCAD + *Software* analisis terpisah) menuntut perencana untuk melakukan setidaknya 8 tahapan pengerjaan manual yang terfragmentasi pada setiap lembar gambar kerja:

1. Memperbarui ukuran penampang pada model *Software* analisis struktur.
2. Melakukan kalkulasi ulang (*re-running analysis*) untuk memastikan keamanan simpangan (*drift*) dan gaya dalam yang baru.
3. Mengubah manual ukuran dimensi balok/kolom pada lembar denah lantai 1 sampai lantai 10 di file CAD.
4. Merevisi garis gambar pada detail potongan bangunan arah memanjang (A-A).
5. Merevisi garis gambar pada detail potongan bangunan arah melintang (B-B).
6. Menyesuaikan ulang gambar detail pembesian (*reinforcement detail*) pada kolom atau balok yang berubah.
7. Memeriksa ulang secara manual (*cross-check*) nomor halaman, notasi, dan kop gambar agar tetap konsisten antar-lembar.

Sementara itu, dengan menerapkan koordinasi dua arah (*Bi-Directional Link*) antara Revit dan RSAP, rangkaian panjang tersebut dipotong menjadi hanya 3 langkah utama yang berjalan secara otomatis:

1. Mengubah ukuran penampang elemen yang tidak memenuhi syarat batas SRPMK (seperti *drift*) langsung di dalam lingkungan Robot Structural Analysis (RSAP).

2. Mengeksekusi perintah *Update Model* untuk mengirimkan kembali parameter dimensi baru.
3. Autodesk Revit secara otomatis mendeteksi perubahan parameter tersebut, sehingga bentuk fisik model 3D, seluruh lembar denah lantai, potongan, hingga penempatan garis analitisnya langsung ter-*Update* secara simultan dalam satu klik tanpa proses menggambar ulang dari nol (*redrafting*).

Pengurangan beban tahapan kerja operasional ini jika dihitung secara matematis menggunakan formulasi rasio adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Reduksi siklus alur kerja} &= \frac{\text{Tahapan Konvensional} - \text{Tahapan BIM}}{\text{Tahapan Konvensional}} \\ &= \frac{8-3}{8} \times 100\% = 62,5\%\end{aligned}$$

Melalui rincian ini, klaim efisiensi dalam Tugas Akhir ini tidak lagi didasarkan pada asumsi kecepatan waktu, melainkan sebuah pembuktian sistemik atas pemangkasan 62,5% mata rantai tahapan kerja manual. Hal ini sekaligus membuktikan relevansi hasil pemodelan dengan teori *benchmark* dari *Oktavianus et al. (2024)* serta menjawab kritik penguji mengenai efisiensi secara objektif karena alur pemodelan terintegrasi ini mampu meminimalisir potensi kesalahan manusia (*human error*) akibat ketidaksinkronan data antar-lembar gambar kerja.

BAB VI

STRUKTUR SEKUNDER

6.1. Sekunder

Struktur sekunder meliputi pelat atap, pelat lantai, tangga, balok penggantung lift dan balok anak. Seperti yang diketahui, struktur sekunder tidak dirancang untuk menahan gaya gempa, melainkan dirancang hanyalah untuk menerima beban lentur. Walaupun demikian, beban pada struktur sekunder tetap mempengaruhi struktur utama.

6.2. Perencanaan Plat Atap

6.2.1. Pembebanan Plat Atap

Struktur sekunder meliputi pelat atap, pelat lantai, tangga, balok penggantung lift dan balok anak. Seperti yang diketahui, struktur sekunder tidak dirancang untuk menahan gaya gempa, melainkan dirancang hanyalah untuk menerima beban lentur. Walaupun demikian, beban pada struktur sekunder tetap mempengaruhi struktur utama.

Hasil perhitungan beban untuk plat atap yang diperoleh dari *preliminary design* pada sub bab 4.4.1 disajikan sebagai berikut :

Beban Mati (qD) = 16345

Beban Hidup (qL) = 479

Beban air Hujan (R) = 612,50

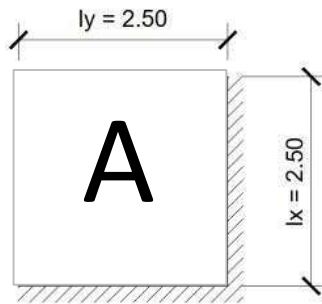
qU atap = 1,2 (16345) + 1,6 (479) + 0,5 (24,50)

= 20392,65 Kg

= 203926,50 N

6.2.2. Perhitungan Momen Plat Atap

Guna mengantisipasi deformasi atau lendutan saat struktur terbebani, perencanaan pelat atap menggunakan asumsi perletakan jepit penuh. Estimasi gaya dalam (momen) dihitung berdasarkan parameter koefisien yang tercantum dalam Tabel 13.3.1 **PBI 1971** (lihat **Gambar 6.1**) untuk memastikan desain penulangan memenuhi kriteria keamanan struktural.



Gambar 6. 1 Tipe Plat

$$\frac{2,5}{2,5} = 1,0 < 2,5 \text{ (Pelat dua arah / Two way slab)}$$

Momen pelat atap berdasarkan dari PBI-1971 Tabel 13.3.1 dengan jenis pelat III :

$$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot C = +0,001 \cdot 685,45 \cdot 2,5^2 \cdot 28 = 119,95 \text{ Kgm}$$

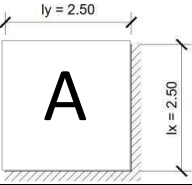
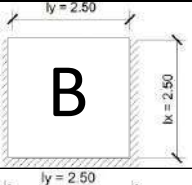
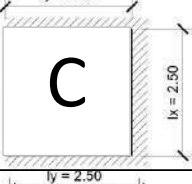
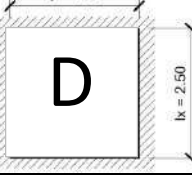
$$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_y^2 \cdot C = +0,001 \cdot 685,45 \cdot 2,5^2 \cdot 28 = 119,95 \text{ Kgm}$$

$$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot C = -0,001 \cdot 685,45 \cdot 2,5^2 \cdot 68 = -291,32 \text{ Kgm}$$

$$M_{ty} = -0,001 \cdot q \cdot l_y^2 \cdot C = -0,001 \cdot 685,45 \cdot 2,5^2 \cdot 68 = -291,32 \text{ Kgm}$$

Diambil momen terbesar arah X (di tumpuan) yaitu $M_{tx} = -291,32 \text{ Kgm}$ dan momen terbesar arah Y (di tumpuan) yaitu $M_{ty} = -291,32 \text{ Kgm}$

Tabel 6. 1 Tabel Momen Plat Atap

Tipe Pelat	Ukuran Pelat	Ly/Lx	Keterangan	C	Momen	Mu (Kg/m)
	2,50 X 2,50	1.0	Two way slab	28	Mlx	119.95
				28	Mly	119.95
				68	Mtx	-291.32
				68	Mty	-291.32
	2,50 X 2,50	1.0	Two way slab	21	Mlx	89.97
				26	Mly	111.39
				55	Mtx	-235.62
				60	Mty	-257.04
	2,50 X 2,50	1.0	Two way slab	26	Mlx	111.39
				21	Mly	89.97
				60	Mtx	-257.04
				55	Mty	-235.62
	2,50 X 2,50	1.0	Two way slab	21	Mlx	89.97
				21	Mly	89.97
				52	Mtx	-222.77
				52	Mty	-222.77

6.2.3. Perhitungan Penulangan Plat Atap

- **Syarat Batas Penulangan Plat Atap**

Perencanaan Apartemen Az-Zahr menggunakan mutu beton $f'_c = 35$ MPa. Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2, faktor distribusi tegangan (β) ditetapkan sebesar 0,85 untuk kuat tekan beton hingga 28 MPa. Karena mutu beton yang digunakan melebihi batas tersebut 28 MPa, maka nilai (β) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\beta = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05 (35 - 28)}{7} = 0,80$$

$$\rho_b = \frac{0,85 (f'_c \cdot \beta)}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 (35 \cdot 0,80)}{280} \cdot \left(\frac{600}{600 + 280} \right) = 0,057$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,057 = 0,0427$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{280} = 0,0050$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f'_c} = \frac{280}{0,85 \cdot 35} = 9,41$$

- **Penulangan Pelat Atap Arah X**

Tebal pelat atap (h) = 100 mm

Tebal selimut beton (s) = 20 mm (SNI 2847:2019 Tabel 20.6.1.3.1)

Diameter tulangan utama (D) = 10 mm

Diameter tulangan susut ($\emptyset$) = 8 mm

Mutu tulangan BjTP 280 = (f_y) = 280 MPa

Direncanakan menggunakan tulangan D10 mm, maka jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik (d_x) yaitu :

$$\begin{aligned} d_x &= h - s - \frac{1}{2} D \\ &= 100 - 20 - \left(\frac{1}{2} \times 10 \right) = 75 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$M_u = M_{tx} = -291,32 \text{ Kgm} = 2913200 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned} M_{nx} &= \frac{M_u}{0,8} \\ &= \frac{2913200}{0,8} = 3641500 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{M_n}{b \cdot d_x^2} \\ &= \frac{3641500}{1000 \cdot 75^2} = 0,65 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

61

23

50

$$\begin{aligned}\rho_{\text{perlu}} &= \frac{1}{m} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{fy}} \right) \\ &= \frac{1}{9,41} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 9,41 \cdot 0,65}{280}} \right) = 0,0024\end{aligned}$$

$\rho < \rho_{\min} < \rho_{\max} = 0,0024 < 0,0050 < 0,0427$, maka dipakai $\rho_{\min} = 0,0050$

Tulangan Perlu Arah X

$$A_s \text{ Perlu} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d_x = 0,0050 \cdot 1000 \cdot 75 = 375 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan D10 – 200 ($A_s \text{ Pakai} = 393 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 375 \text{ mm}^2$)

Tulangan Susut Arah X

$$A_{ss} \text{ Susut} = 0,002 \cdot b \cdot h = 0,002 \cdot 1000 \cdot 100 = 200 \text{ mm}^2$$

Dipakai $\emptyset 8 - 250$ ($A_s \text{ Pakai} = 201 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 200 \text{ mm}^2$)

Kontrol tulangan arah X

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{A_s \text{ pakai}}{b \cdot x \cdot dx} \\ &= \frac{393}{1000 \cdot x \cdot 75} \\ &= 0,005 \\ a &= \frac{A_s \text{ pakai} \cdot x \cdot F_y}{0,85 \cdot x \cdot F_c \cdot b} \\ &= \frac{393 \cdot x \cdot 280}{0,85 \cdot x \cdot 35 \cdot 1000} \\ &= 3,70 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_n &= A_s \text{ pakai} \cdot x \cdot F_y \left(dx - \frac{a}{2} \right) \\ &= 393 \cdot x \cdot 280 \left(75 - \frac{3,70}{2} \right) \\ &= 8049426 \text{ Nmm} > M_n \text{ perlu} = 3641500 \text{ Nmm (OK)}\end{aligned}$$

Kontrol Jarak Tulangan

Jarak tulangan $\leq 3 \times \text{tebal pelat}$

150 mm $\leq 3 (100)$

150 mm $\leq 300 \text{ mm (OK)}$

Kontrol Tulangan Susut

$$\begin{aligned}A_{ss} &= \frac{1}{4} \times \phi^2 \times \pi \times \frac{b}{s} \\ &= \frac{1}{4} \times 8^2 \times \pi \times \frac{1000}{250} \\ &= 201,10 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 200 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

- **Penulangan Pelat Atap Arah Y**

Tebal pelat atap (h) = 100 mm

Tebal selimut beton (s) = 20 mm (SNI 2847:2019 Tabel 20.6.1.3.1)

Diameter tulangan utama (D) = 10 mm

Diameter tulangan susut ($\emptyset$) = 8 mm

Mutu tulangan BjTP 280 = (f_y) = 280 MPa

Direncanakan menggunakan tulangan D 10 mm, maka jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik (d_y) yaitu :

$$\begin{aligned} d_y &= h - s - D_x - 0,5D_y \\ &= 100 - 20 - 10 - \left(\frac{1}{2} \times 10\right) \\ &= 65 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$M_u = M_{tx} = -291,32 \text{ Kgm} = 2913200 \text{ Nmm}$$

$$M_{ny} = \frac{M_u}{0,8} = \frac{2913200}{0,8} = 3641500 \text{ Nmm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d_y^2} = \frac{3641500}{1000 \cdot 65^2} = 0,86 \text{ N/mm}^2$$

$$m = \frac{F_y}{0,85 \times F'c} = \frac{280}{0,85 \times 35} = 9,41$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{perlu}} &= \frac{1}{m} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}}\right) \\ &= \frac{1}{9,41} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 9,41 \cdot 0,86}{280}}\right) = 0,0031 \end{aligned}$$

$$\rho < \rho_{\min} < \rho_{\max} = 0,0031 < 0,0050 < 0,0427, \text{ maka dipakai } \rho_{\min} = 0,0050$$

Tulangan Perlu Arah Y

$$A_s \text{ Perlu} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d_y = 0,0050 \cdot 1000 \cdot 65 = 325 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai D10 - 240 } (A_s = 327,3 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 325 \text{ mm}^2)$$

Tulangan Susut Arah Y

$$A_{ss} \text{ Susut} = 0,002 \cdot b \cdot h = 0,002 \cdot 1000 \cdot 100 = 200 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai } \emptyset 8 - 230 (A_s = 218 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 200 \text{ mm}^2)$$

Kontrol tulangan arah Y

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{A_s \text{ pakai}}{b \times d_y} \\ &= \frac{327,3}{1000 \times 65} \\ &= 0,005 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{As \text{ pakai } \times Fy}{0,85 \times Fc \times b} \\
 &= \frac{327,3 \times 280}{0,85 \times 35 \times 1000} \\
 &= 3,08 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Mn &= As \text{ pakai } \times Fy \left(dy - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 327,3 \times 280 \left(65 - \frac{3,08}{2} \right) \\
 &= 5815728,24 \text{ Nmm} > Mn \text{ perlu} = 3641500 \text{ Nmm (OK)}
 \end{aligned}$$

Kontrol Jarak Tulangan

$$\text{Jarak tulangan} \leq 3 \times \text{tebal pelat}$$

$$240 \text{ mm} \leq 3 (100)$$

$$240 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm (OK)}$$

Kontrol Tulangan Susut

$$\begin{aligned}
 Ass &= \frac{1}{4} \times \phi^2 \times \pi \times \frac{b}{s} \\
 &= \frac{1}{4} \times 8^2 \times \pi \times \frac{1000}{230} \\
 &= 218,55 \text{ mm}^2 > As \text{ Perlu} = 200 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

• **Kontrol Retak Plat Lantai**

Perhitungan kontrol retak berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 12.6.4 untuk penampang yang dipengaruhi cuaca luar sebagai berikut :

$$Z = fs \sqrt[3]{dc \cdot A}$$

$$fs = 60\% \times fy = 0,6 \times 280 = 168 \text{ MPa}$$

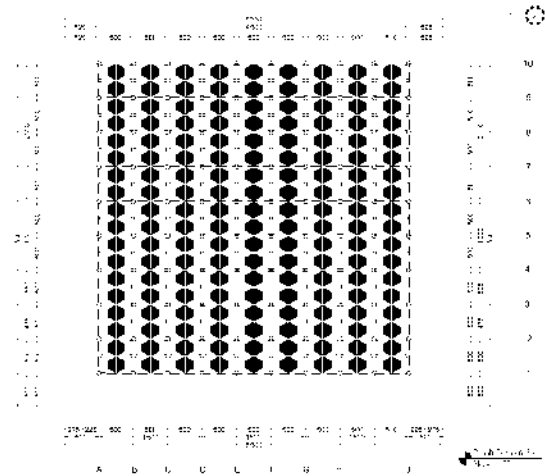
$$dc = s + \left(\frac{1}{2} \phi \right) = 20 + \left(\frac{1}{2} \cdot 10 \right) = 25 \text{ mm}$$

$$A = 2 \times dc \times h = 2 \times 25 \times 120 = 6000 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned}
 Z &= fs \sqrt[3]{dc \cdot A} = 168 \cdot \sqrt[3]{25 \cdot 6000} \\
 &= 8926 = 8,92 \text{ MN/m} \leq 25 \text{ MN/m}
 \end{aligned}$$

6.3. Perencanaan Pelat Lantai

6.3.1. Pembebanan Plat Lantai



Gambar 6. 2 Denah **Plat Lantai Ekuivalen**

Hasil perhitungan **beban** untuk plat lantai yang diperoleh dari *preliminary design* pada sub bab 4.4.1 disajikan sebagai berikut :

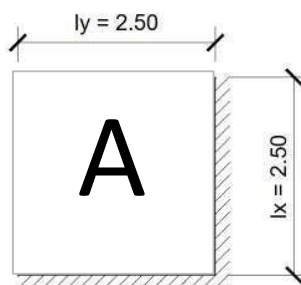
$$\text{Beban Mati (qD)} = 183330 \text{ kg}$$

$$\text{Beban Hidup (qL)} = 1728 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} q_U \text{ atap} &= 1,2 (183330) + 1,6 (1728) \\ &= 222760,8 \text{ Kg} \\ &= 2227608 \text{ N} \end{aligned}$$

6.3.2. Perhitungan Momen Plat Lantai

Guna mengantisipasi deformasi atau lendutan saat struktur terbebani, perencanaan pelat lantai menggunakan asumsi perletakan jepit penuh. Estimasi gaya dalam (momen) dihitung



berdasarkan parameter koefisien yang tercantum dalam Tabel 13.3.1 **PBI 1971** (lihat **Gambar 5.2**) untuk memastikan desain penulangan memenuhi kriteria keamanan struktural.

Gambar 6. 3 Tipe Plat Lantai

$$\frac{2,5}{2,5} = 1,0 < 2,5 \text{ (Pelat dua arah / Two way slab)}$$

Momen pelat atap berdasarkan dari PBI-1971 Tabel 13.3.1 dengan jenis pelat III :

$$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot C = +0,001 \cdot 962,4 \cdot 2,5^2 \cdot 28 = 168,42 \text{ Kgm}$$

$$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_y^2 \cdot C = +0,001 \cdot 962,4 \cdot 2,5^2 \cdot 28 = 168,42 \text{ Kgm}$$

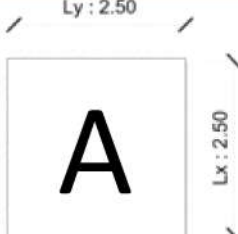
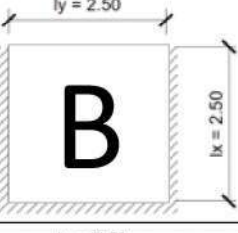
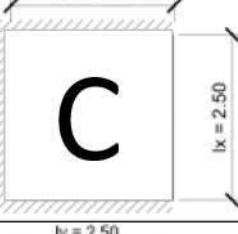
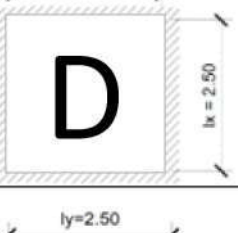
$$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot C = -0,001 \cdot 962,4 \cdot 2,5^2 \cdot 68 = -409,02 \text{ Kgm}$$

$$M_{ty} = -0,001 \cdot q \cdot l_y^2 \cdot C = -0,001 \cdot 962,4 \cdot 2,5^2 \cdot 68 = -409,02 \text{ Kgm}$$

Diambil momen terbesar arah X yaitu $M_{tx} = -409,02 \text{ Kgm}$ dan momen terbesar arah Y yaitu

$$M_{ty} = -409,02 \text{ Kgm}$$

Tabel 6. 2 Momen Plat Lantai

Typo Pelat	Ukuran Pelat	L_y/L_x	Keterangan	C	Momen	M_u (Kg/m)
	2,50 X 2,50	1.0	Two way slab	28	Mlx	168.42
				28	Mly	168.42
				68	Mtx	-409.02
				68	Mty	-409.02
	2,50 X 2,50	1.0	Two way slab	21	Mlx	126.32
				26	Mly	156.39
				55	Mtx	-330.83
				60	Mty	-360.90
	2,50 X 2,50	1.0	Two way slab	26	Mlx	156.39
				21	Mly	126.32
				60	Mtx	-360.90
				55	Mty	-330.83
	2,50 X 2,50	1.0	Two way slab	21	Mlx	126.32
				21	Mly	126.32
				52	Mtx	-312.78
				52	Mty	-312.78
	2,50 X 1,50	0.6	Two way slab	21	Mlx	126.32
				21	Mly	126.32
				52	Mtx	-312.78
				52	Mty	-312.78

6.3.3. Perhitungan Momen Plat Lantai

- Syarat Batas Peulangan Plat Lantai**

Perencanaan Apartemen Az-Zahr menggunakan mutu beton $f_c = 35$ MPa. Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2, faktor distribusi tegangan (β) ditetapkan sebesar 0,85 untuk kuat tekan beton hingga 28 MPa. Karena mutu beton yang digunakan melebihi batas tersebut 28 MPa, maka nilai (β) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}\beta &= 0,85 - \frac{0,05 (f'c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05 (35 - 28)}{7} = 0,80 \\ \rho_b &= \frac{0,85 (f'c \cdot \beta)}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 (35 \cdot 0,80)}{280} \cdot \left(\frac{600}{600 + 280} \right) = 0,057 \\ \rho_{\max} &= 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,057 = 0,0427 \\ \rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{280} = 0,0050 \\ m &= \frac{f_y}{0,85 \cdot f'c} = \frac{280}{0,85 \cdot 35} = 9,41\end{aligned}$$

- **Penulangan Pelat Lantai Arah X**

Tebal pelat lantai (h) = 120 mm

Tebal selimut beton (s) = 20 mm (SNI 2847:2019 Tabel 20.6.1.3.1)

Diameter tulangan utama (D) = 10 mm

Diameter tulangan susut ($\emptyset$) = 8 mm

Mutu tulangan BjTP 280 = (f_y) = 280 MPa

Direncanakan menggunakan tulangan D10 mm, maka jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik (d_x) yaitu :

$$\begin{aligned}d_x &= h - s - \frac{1}{2} D \\ &= 120 - 20 - \left(\frac{1}{2} \times 10 \right) = 95 \text{ mm} \\ M_u &= M_{tx} = -409,02 \text{ Kgm} = 4090200 \text{ Nmm} \\ M_{nx} &= \frac{M_u}{0,8} \\ &= \frac{4090200}{0,8} = 5112750 \text{ Nmm} \\ R_n &= \frac{M_n}{b \cdot d_x^2} \\ &= \frac{5112750}{1000 \cdot 95^2} = 0,57 \text{ N/mm}^2 \\ \rho_{\text{perlu}} &= \frac{1}{m} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}} \right) \\ &= \frac{1}{9,41} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 9,41 \cdot 0,57}{280}} \right) = 0,0021\end{aligned}$$

$\rho < \rho_{\min} < \rho_{\max} = 0,0021 < 0,0050 < 0,0427$, maka dipakai $\rho_{\min} = 0,0050$

Tulangan Perlu Arah X

$A_s \text{ Perlu} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d_x = 0,0050 \cdot 1000 \cdot 95 = 475 \text{ mm}^2$

Dipakai tulangan D10 – 160 ($A_s \text{ Pakai} = 491 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 475 \text{ mm}^2$)

Tulangan Susut Arah X

$$A_{ss \text{ Susut}} = 0,002 \cdot b \cdot h = 0,002 \cdot 1000 \cdot 120 = 240 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai } \varnothing 8 - 200 (A_s \text{ Pakai} = 251 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 240 \text{ mm}^2)$$

Kontrol tulangan arah X

$$\rho = \frac{A_s \text{ pakai}}{b \times dx}$$

$$= \frac{491}{1000 \times 95}$$

$$= 0,005$$

$$a = \frac{A_s \text{ pakai} \times F_y}{0,85 \times F_c' \times b}$$

$$= \frac{491 \times 280}{0,85 \times 35 \times 1000}$$

$$= 4,62 \text{ mm}$$

$$M_n = A_s \text{ pakai} \times F_y \left(dx - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 491 \times 280 \left(95 - \frac{4,62}{2} \right)$$

$$= 12743021 \text{ Nmm} > M_n \text{ perlu} = 5112750 \text{ Nmm (OK)}$$

Kontrol Jarak Tulangan

$$\text{Jarak tulangan} \leq 3 \times \text{tebal pelat}$$

$$160 \text{ mm} \leq 3 (120)$$

$$160 \text{ mm} \leq 360 \text{ mm (OK)}$$

Kontrol Tulangan Susut

$$A_{ss} = \frac{1}{4} \times \phi^2 \times \pi \times \frac{b}{s}$$

$$= \frac{1}{4} \times 8^2 \times \pi \times \frac{1000}{200}$$

$$= 251 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 240 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

• **Penulangan Pelat Lantai Arah Y**

$$\text{Tebal pelat Lantai (h)} = 120 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal selimut beton (s)} = 20 \text{ mm (SNI 2847:2019 Tabel 20.6.1.3.1)}$$

$$\text{Diameter tulangan utama (D)} = 10 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter tulangan susut } (\varnothing) = 8 \text{ mm}$$

$$\text{Mutu tulangan BjTP 280} = (f_y) = 280 \text{ MPa}$$

Direncanakan menggunakan tulangan D 10 mm, maka jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik (d_y) yaitu :

$$\begin{aligned}d_y &= h - s - D_x - 0,5D_y \\&= 120 - 20 - 10 - (1/2 \times 10) \\&= 85 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

$$M_u = M_{tx} = -409,02 \text{ Kgm} = 4090200 \text{ Nmm}$$

$$M_{ny} = \frac{M_u}{0,8} = \frac{4090200}{0,8} = 5112750 \text{ Nmm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d_y^2} = \frac{5112750}{1000 \cdot 85^2} = 0,71 \text{ N/mm}^2$$

$$m = \frac{F_y}{0,85 \times F_{rc}} = \frac{280}{0,85 \times 35} = 9,41$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{perlu}} &= \frac{1}{m} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}}\right) \\&= \frac{1}{9,41} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 9,41 \cdot 0,71}{280}}\right) = 0,0026\end{aligned}$$

$$\rho < \rho_{\min} < \rho_{\max} = 0,0026 < 0,0050 < 0,0427, \text{ maka dipakai } \rho_{\min} = 0,0050$$

Tulangan Perlu Arah Y

$$A_{s \text{ Perlu}} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d_y = 0,0050 \cdot 1000 \cdot 85 = 425 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai D10 - 180 } (A_s = 436,3 \text{ mm}^2 > A_{s \text{ Perlu}} = 425 \text{ mm}^2)$$

Tulangan Susut Arah Y

$$A_{ss \text{ Susut}} = 0,002 \cdot b \cdot h = 0,002 \cdot 1000 \cdot 120 = 240 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai } \emptyset 8 - 200 (A_s = 251 \text{ mm}^2 > A_{ss \text{ Perlu}} = 240 \text{ mm}^2)$$

Kontrol tulangan arah Y

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{A_{s \text{ pakai}}}{b \times d_y} \\&= \frac{436,3}{1000 \times 85} \\&= 0,005\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a &= \frac{A_{s \text{ pakai}} \times F_y}{0,85 \times F_c \times b} \\&= \frac{436,3 \times 280}{0,85 \times 35 \times 1000} \\&= 4,11 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_n &= A_{s \text{ pakai}} \times F_y \left(d_y - \frac{a}{2}\right) \\&= 436,3 \times 280 \left(85 - \frac{4,11}{2}\right)\end{aligned}$$

$$= 10132892,98 \text{ Nmm} > M_n \text{ perlu} = 5112750 \text{ Nmm (OK)}$$

Kontrol Jarak Tulangan

$$\text{Jarak tulangan} \leq 3 \times \text{tebal pelat}$$

$$180 \text{ mm} \leq 3 (120)$$

$$180 \text{ mm} \leq 360 \text{ mm (OK)}$$

Kontrol Tulangan Susut

$$A_{ss} = \frac{1}{4} \times \phi^2 \times \pi \times \frac{b}{s}$$

$$= \frac{1}{4} \times 8^2 \times \pi \times \frac{1000}{200}$$

$$= 251,33 \text{ mm}^2 > A_s \text{ Perlu} = 240 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

• **Kontrol Retak Plat Lantai**

Perhitungan kontrol retak berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 12.6.4 untuk penampang yang dipengaruhi cuaca luar sebagai berikut :

$$Z = f_s \sqrt[3]{dc \cdot A}$$

$$f_s = 60\% \times f_y = 0,6 \times 280 = 168 \text{ MPa}$$

$$dc = s + \left(\frac{1}{2} \phi\right) = 20 + \left(\frac{1}{2} \cdot 10\right) = 25 \text{ mm}$$

$$A = 2 \times dc \times h = 2 \times 25 \times 120 = 6000 \text{ mm}^2$$

$$Z = f_s \sqrt[3]{dc \cdot A} = 168 \cdot \sqrt[3]{25 \cdot 6000}$$

$$= 8926$$

$$= 8,92 \text{ MN/m} \leq 25 \text{ Mn/m, untuk penampang luar ruangan}$$

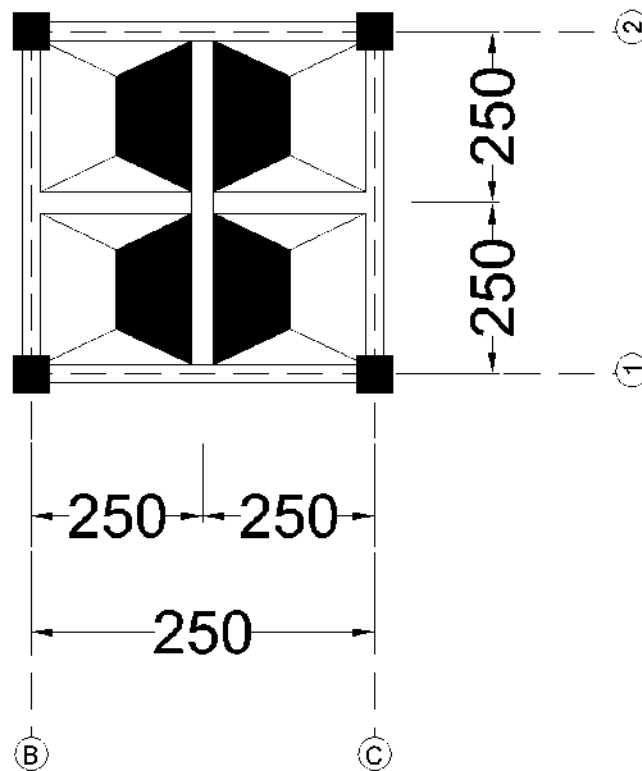
(OK)

$$R = 0,0098 \times (ds + dh)$$

Dengan mengasumsikan kedalaman air pada atap (ds) ialah 15 mm, dan tambahan untuk kedalaman air pada atap diatas lubang drainase (dh) ialah 10 mm, maka untuk beban air hujan (qR) diperoleh :

$$\begin{aligned} R &= 0,0098 \times (ds + dh) \\ &= 0,0098 \times (15 + 10) \\ &= 0,245 \text{ kN/m}^2 \\ &= 24,50 \text{ Kg/m}^2 \end{aligned}$$

- **Pembebanan Pelat Atap Ekuivalen Trapesium Pada Balok Anak Atap (BA 25/40 cm)**



Gambar 6. 5 Pembebanan Trapesium Pada Balok Anak Atap (25/40)
Beban Mati (Dead Load)

$$\text{Berat sendiri balok} = 0,25 \times (0,40 - 0,10) \times 2400 \text{ Kg/m}^2 = 180 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Beban ekuivalen} = \left(\frac{1}{2} \times qd \times lx \right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{lx}{ly} \right)^2 \right) \times 2$$

$$= \left(\frac{1}{2} \times 330 \times 2,50 \right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{2,50}{2,50} \right)^2 \right) \times 2$$

$$= 550 \text{ Kg/m}$$

Total beban mati = beban sendiri balok + beban ekuivalen

$$= 180 + 550 = 730 \text{ Kg/m}$$

Beban Hidup (Live Load)

Beban ekuivalen $= \left(\frac{1}{2} \times ql \times lx \right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{lx}{ly} \right)^2 \right) \times 2$

$$= \left(\frac{1}{2} \times 479 \times 2,50 \right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{2,50}{2,50} \right)^2 \right) \times 2$$

$$= 798,3 \text{ Kg/m}$$

Beban Air Hujan

Beban ekuivalen $= \left(\frac{1}{2} \times R \times lx \right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{lx}{ly} \right)^2 \right) \times 2$

$$= \frac{1}{2} \times 24,50 \times 2,50 \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{2,50}{2,50} \right)^2 \right) \times 2$$

$$= 40,83 \text{ Kg/m}$$

Beban Ultimate

Qu = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (A atau R)

$$= 1,2 (889,67) + 1,6 (160) + 0,5 (40,83)$$

$$= 1344,01 \text{ Kg/m}$$

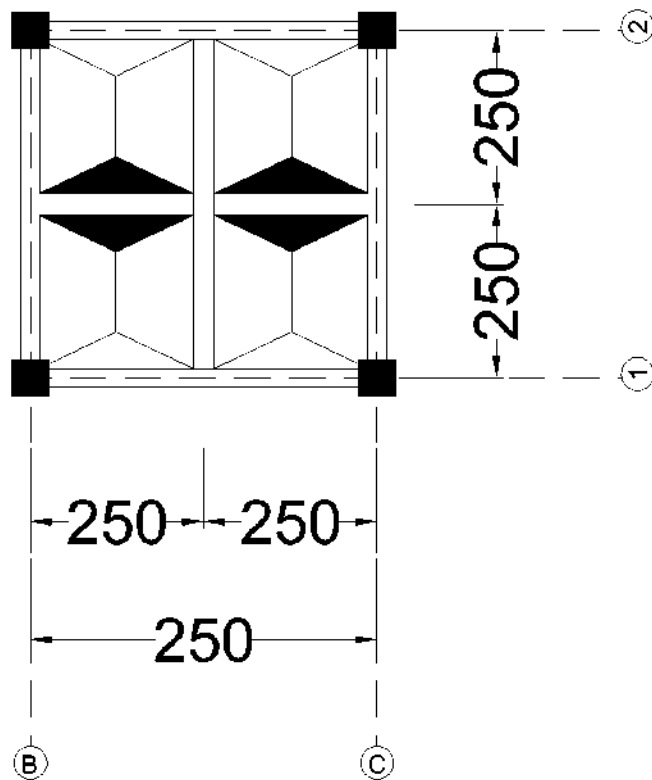
Perhitungan Gaya Dalam

$M_{\text{Tumpuan}} = \frac{1}{11} Qu l^2 = \frac{1}{11} \cdot 1344,01 \cdot 5^2 = 3054,568 \text{ Kgm}$

$M_{\text{Lapangan}} = \frac{1}{16} Qu l^2 = \frac{1}{16} \cdot 1344,01 \cdot 5^2 = 2100,015 \text{ Kgm}$

$V_u = \frac{1}{2} Qu l = \frac{1}{2} \cdot 1344,01 \cdot 5 = 3360,025 \text{ Kgm}$

- **Pembebanan Pelat Atap Ekuivalen Segitiga Pada Balok Anak Atap (BA 25/40 cm)**



Gambar 6. 6 Pembebanan Segitiga Pada Balok Anak Atap (25/40)
Beban Mati (Dead Load)

Berat sendiri balok $= 0,25 \times (0,40 - 0,10) \times 2400 \text{ Kg/m}^2 = 180 \text{ Kg/m}$

Beban ekuivalen $= \left(\frac{1}{3} \times qd \times lx \right) \times 2$
 $= \left(\frac{1}{3} \times 330 \times 2,50 \right) \times 2$
 $= 550 \text{ Kg/m}$

Total beban mati $= \text{beban sendiri balok} + \text{beban ekuivalen}$
 $= 180 + 550$
 $= 1100 \text{ Kg/m}$

Beban Hidup (Live Load)

Beban ekuivalen $= \left(\frac{1}{3} \times ql \times lx \right) \times 2$
 $= \left(\frac{1}{3} \times 479 \times 2,50 \right) \times 2$
 $= 798,3 \text{ Kg/m}$

Beban Air Hujan

$$\begin{aligned}\text{Beban ekuivalen} &= \left(\frac{1}{3} \times R \times lx \right) \times 2 \\ &= \left(\frac{1}{3} \times 24,50 \times 2,50 \right) \times 2 \\ &= 40,83 \text{ Kg/m}\end{aligned}$$

Beban Ultimate

$$\begin{aligned}Q_u &= 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (A \text{ atau } R) \\ &= 1,2 (1100) + 1,6 (798,3) + 0,5 (40,83) \\ &= 2599,32 \text{ Kg/m}\end{aligned}$$

Perhitungan Gaya Dalam

$$\begin{aligned}M_{\text{Tumpuan}} &= \frac{1}{11} Q_u l^2 = \frac{1}{11} \cdot 2599,32 \cdot 5^2 = 5907,54 \text{ Kgm} \\ M_{\text{Lapangan}} &= \frac{1}{16} Q_u l^2 = \frac{1}{16} \cdot 2599,32 \cdot 5^2 = 4061,44 \text{ Kgm} \\ V_u &= \frac{1}{2} Q_u l = \frac{1}{2} \cdot 2599,32 \cdot 5 = 32491,50 \text{ Kgm}\end{aligned}$$

6.4.2. Penulangan Lentur Balok Anak Atap (BA 25/40cm)

- Data Perencanaan**

$$\text{Mutu beton } (f'_c) = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Dimensi balok} = 25 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$$

$$\text{Tebal selimut beton} = 40 \text{ mm (SNI 2847:2019 Tabel 20.6.1.3.1)}$$

$$\text{BJTS 420A Tulangan utama } f_y = 420 \text{ MPa}$$

$$\text{Diameter tulangan utama} = D13 \text{ mm}$$

$$\text{BJTP 280 Tulangan sengkang } f_y = 280 \text{ MPa}$$

$$\text{Diameter tulangan sengkang} = \emptyset 8 \text{ mm}$$

Lebar efektif balok anak atap:

$$d = h - s - \left(\frac{1}{2} D_{\text{tul. utama}} \right) - \emptyset_{\text{tul. sengkang}} = 400 - 40 - \left(\frac{1}{2} \cdot 13 \right) - 8 = 346 \text{ mm}$$

$$d' = s - \left(\frac{1}{2} D_{\text{tul. utama}} \right) + \emptyset_{\text{tul. sengkang}} = 40 + \left(\frac{1}{2} \cdot 13 \right) + 8 = 55 \text{ mm}$$

- Penulangan Daerah Tumpuan**

$$M_u = 3054,568 \text{ Kgm} = 30545680 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{30545680}{0,8} = 38182100 \text{ Nmm}$$

$$X_{\text{max}} = 0,75 \cdot \frac{600 \cdot d}{600 + f_y} = 0,75 \cdot \frac{600 \cdot 346}{600 + 420} = 152,64 \text{ mm}$$

Jarak $x \leq x_{maks}$, maka diambil nilai $x = 120$ mm

$$A_{sc} = \frac{0,85 \cdot f_c' \cdot \beta \cdot b \cdot x}{f_y} = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,8 \cdot 250 \cdot 120}{420} = 1700 \text{ mm}^2$$

$$M_{nc} = A_{sc} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\beta \cdot x}{2} \right) = 1700 \cdot 420 \cdot \left(346 - \frac{0,8 \cdot 120}{2} \right) = 212772000 \text{ Nmm}$$

$$M_{ns} = M_n - M_{nc} = 38182100 - 212772000 = -174589900 \text{ Nmm}$$

$M_{ns} \leq 0$, maka tidak perlu tulangan tekan dan hanya didesain dengan tulangan tunggal.

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{38182100}{250 \cdot 346^2} = 1,275 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 1,275}{420}} \right) = 0,0031$$

$$\rho_{perlu} = 0,0031 < \rho_{min} = 0,0033, \text{ maka dipakai } \rho_{min} = 0,0033$$

Tulangan tumpuan atas :

$$A_s \text{ Perlu} = \rho_{min} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 250 \cdot 346 = 285,45 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan 3D13 ($A_s = 398 \text{ mm}^2$) $> A_s \text{ perlu} = 285,45 \text{ mm}^2$ (OK)

Tulangan tumpuan bawah :

$$A_s' = \delta \cdot A_s \text{ pakai} = 0,5 \times 398 = 199 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

Kontrol tulangan :

$$a = \frac{A_s \text{ pakai} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{398 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 250} = 22,47$$

$$M_n = A_s \text{ pakai} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 398 \cdot 420 \cdot \left(346 - \frac{22,47}{2} \right) = 55959317,4 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 55959317,4 \text{ Nmm} > M_n \text{ awal} = 38182100 \text{ Nmm (OK)}$$

• Daerah Lapangan

$$M_u = 2100,015 \text{ Kgm} = 21000150 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{21000150}{0,8} = 26250187,5 \text{ Nmm}$$

$$X_{max} = 0,75 \cdot \frac{600 \cdot d}{600 + f_y} = 0,75 \cdot \frac{600 \cdot 346}{600 + 42} = 152,64 \text{ mm}$$

Jarak $x \leq x_{maks}$, maka diambil nilai $x = 120$ mm

$$A_{sc} = \frac{0,85 \cdot f_c' \cdot \beta \cdot b \cdot x}{f_y} = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,8 \cdot 250 \cdot 120}{420} = 1700 \text{ mm}^2$$

$$M_{nc} = A_{sc} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\beta \cdot x}{2} \right) = 1700 \cdot 420 \cdot \left(346 - \frac{0,8 \cdot 120}{2} \right) = 212772000 \text{ Nmm}$$

$$M_{ns} = M_n - M_{nc} = 26250187,5 - 212772000 = -186521812,5 \text{ Nmm}$$

$M_{ns} \leq 0$, maka tidak perlu tulangan tekan dan hanya didesain dengan tulangan tunggal.

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{26250187,5}{250 \cdot 346^2} = 0,877 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 0,877}{420}} \right) = 0,0021$$

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,0021 < \rho_{\text{min}} = 0,0033 \text{ (dipakai } \rho_{\text{min}} = 0,0033)$$

Tulangan lapangan bawah :

$$A_s \text{ Perlu} = \rho_{\text{min}} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 250 \cdot 346 = 285,45 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan 3D13 ($A_s = 398 \text{ mm}^2$)

Tulangan lapangan atas :

$$A_s' = \delta \cdot A_s \text{ pakai} = 0,5 \times 398 = 199 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

Kontrol tulangan :

$$a = \frac{A_s \text{ pakai} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{398 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 250} = 22,47$$

$$M_n = A_s \text{ pakai} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 398 \cdot 420 \cdot \left(346 - \frac{22,47}{2} \right) = 55959317,4 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 55959317,4 \text{ Nmm} > M_n \text{ awal} = 26250187,5 \text{ Nmm (OK)}$$

Maka dipakai tulangan lentur balok anak atap (BA 25/40) untuk daerah tumpuan dan lapangan adalah :

Tulangan lentur daerah tumpuan : Atas : 3D13 ($A_s = 398 \text{ mm}^2$) & Bawah : 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

Tulangan lentur daerah lapangan : Bawah : 3D13 ($A_s = 398 \text{ mm}^2$) & Atas : 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

6.4.3. Penulangan Geser Balok Anak Atap (BA 25/40cm)

- **Daerah Tumpuan**

$$\text{Beban geser terfaktor (Vu)} = 3360,025 \text{ Kg} = 33600,25 \text{ N}$$

$$\text{Kekuatan geser beton (Vc)} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{35} \cdot 250 \cdot 346 = 85290,15 \text{ N}$$

Kategori desain (SNI SNI 2847:2019 Pasal 22.5) :

$$\phi V_c = 0,75 \times 85290,15 = 63967,61 \text{ N}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \phi V_c = \frac{1}{2} \times 63967,61 = 31983,80 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
V_s &= \frac{1}{3} \cdot b_w \cdot d &= \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 346 &= 28833,33 \text{ N} \\
\phi V_s & &= 0,75 \times 28833,33 &= 21624,99 \text{ N} \\
\phi V_c + \phi V_s & &= 63967,61 + 21624,99 &= 85592,60 \text{ N} \\
\text{Min. } \phi V_s & &= 0,6 \times 21624,99 &= 12974,99 \text{ N} \\
\phi V_c + \text{min } \phi V_s & &= 63967,61 + 12974,99 &= 76942,60 \text{ N} \\
\phi \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d & &= 0,6 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 346 &= 102348,18 \text{ N} \\
\phi V_c + \phi \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d & &= 63967,61 + 102348,18 &= 166315,79 \text{ N} \\
\phi \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d & &= 0,6 \times \frac{2}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 346 &= 204696,36 \text{ N} \\
\phi V_c + \phi \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d & &= 63967,61 + 204696,36 &= 268663,96 \text{ N}
\end{aligned}$$

Kategori desain :

Untuk $V_u = 33600,25 \text{ N}$, maka termasuk dalam kategori desain ke – 2, dimana
 $(\frac{1}{2} \cdot \phi V_c) < V_u \leq \phi V_c = 31983,80 \text{ N} < 33600,25 \text{ N} \leq 63967,61 \text{ N}$

$$\text{Max. } S \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{346}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq 173 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm}$$

Direncanakan sengkang dengan jarak $S = 120 \text{ mm}$

Maka luas penampang adalah :

$$A_{v_{\min}} = \frac{b_w \cdot S}{3 \cdot f_y} = \frac{250 \times 120}{3 \times 280} = 35,71 \text{ mm}^2$$

Dipakai sengkang 2 kaki $\phi 8 \text{ mm}$:

$$A_v = n \frac{1}{4} \pi d^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48 \text{ mm}^2 > A_{v_{\min}} = 35,71 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gaya perlawanan sengkang :

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v \cdot f_y \cdot d}{S} = \frac{0,75 \cdot 100,48 \cdot 280 \cdot 346}{120} = 60840,64 \text{ N} > 12974,99 \text{ N (OK)}$$

- **Daerah Lapangan**

Beban geser terfaktor (V_u) = 3360,025 Kg = 33600,25 N

$$\text{Kekuatan geser beton } (V_c) = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{35} \cdot 250 \cdot 346 = 85290,15 \text{ N}$$

Kategori desain :

$$\begin{aligned}
\phi V_c & &= 0,75 \times 85290,15 &= 63967,61 \text{ N} \\
\frac{1}{2} \cdot \phi V_c & &= \frac{1}{2} \times 63967,61 &= 31983,80 \text{ N} \\
V_s = \frac{1}{3} \cdot b_w \cdot d & &= \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 346 &= 28833,33 \text{ N}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\emptyset V_s &= 0,75 \times 28833,33 &= 21624,99 \text{ N} \\
\emptyset V_c + \emptyset V_s &= 63967,61 + 21624,99 &= 85592,60 \text{ N} \\
\text{Min. } \emptyset V_s &= 0,6 \times 21624,99 &= 12974,99 \text{ N} \\
\emptyset V_c + \text{min } \emptyset V_s &= 63967,61 + 12974,99 &= 76942,60 \text{ N} \\
\emptyset \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d &= 0,6 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 346 &= 102348,18 \text{ N} \\
\emptyset V_c + \emptyset \cdot \frac{1}{3} \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d &= 63967,61 + 102348,18 &= 166315,79 \text{ N} \\
\emptyset \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d &= 0,6 \times \frac{2}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 346 &= 204696,36 \text{ N} \\
\emptyset V_c + \emptyset \cdot \frac{2}{3} \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d &= 63967,61 + 204696,36 &= 268663,96 \text{ N}
\end{aligned}$$

Kategori desain :

Untuk $V_u = 33600,25 \text{ N}$, maka termasuk dalam kategori desain ke – 2, dimana
 $(\frac{1}{2} \cdot \emptyset V_c) < V_u \leq \emptyset V_c = 31983,80 \text{ N} < 33600,25 \text{ N} \leq 63967,61$

$$\text{Max. } S \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{346}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq 173 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm}$$

Direncanakan sengkang dengan jarak $S=150 \text{ mm}$

Maka luas penampang adalah :

$$A_{v_{\min}} = \frac{b_w S}{3 f_y} = \frac{250 \times 150}{3 \times 280} = 44,64 \text{ mm}^2$$

Dipakai sengkang 2 kaki $\emptyset 8 \text{ mm}$:

$$A_v = n \frac{1}{4} \pi d^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48 \text{ mm}^2 > 44,64 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gaya perlawanan sengkang :

$$\emptyset V_s = \frac{\emptyset A_v \cdot f_y \cdot d}{S} = \frac{0,75 \cdot 100,48 \cdot 280 \cdot 346}{150} = 48672,51 \text{ N} > A_{v_{\min}} = 12974,99 \text{ N (OK)}$$

Maka dipakai tulangan geser balok anak atap (BA 25/40) untuk daerah tumpuan dan lapangan adalah :

Tulangan geser daerah tumpuan : $\emptyset 8 - 120 \text{ mm}$

Tulangan geser daerah lapangan : $\emptyset 8 - 150 \text{ mm}$

6.5. Perencanaan Balok Anak Lantai

6.5.1. Pembebanan Balok Anak Lantai

Beban Mati (Dead Load)

Beban mati pelat atap, berdasarkan SNI 1727:1989 Pasal 2.1.1)

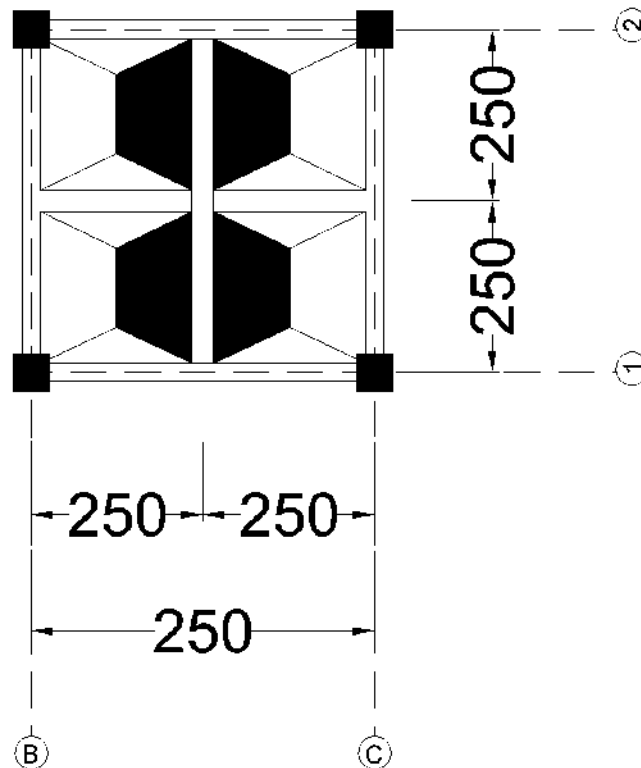
Berat Sendiri Pelat Lantai	= 0,12 x 2400	= 288 Kg/m ²
Instalasi + Ducting	= 50	= 50 Kg/m ²
Plafond + Penggantung	= 18	= 18 Kg/m ²
Keramik	= 2 x 24	= 48 Kg/m ²
Spesi 2 cm	= 2 x 21	= 42 Kg/m ²
Beban Furniture	= 100	= 100 Kg/m ² +
Beban Mati Pelat Lantai (DL)		= 546 Kg/m ²

Beban Hidup (Live Load)

Beban hidup lantai = 192 Kg/m², berdasarkan SNI 1727:2020, Tabel 4.3-1

Beban Hidup (LL) = 192 Kg/m²

- **Pembebanan Pelat Lantai Ekuivalen Trapesium Pada Balok Anak Lantai (BA 25/40 cm)**



Gambar 6. 7 Pembebanan Trapesium Pada Balok Anak Lantai (25/40)

Beban Mati (Dead Load)

Berat sendiri balok = 0,25 x (0,40 – 0,12) x 2400 Kg/m² = 168 Kg/m

Beban ekuivalen = $\left(\frac{1}{2} \times qd \times lx\right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{lx}{ly}\right)^2\right) \times 2$

$$= \left(\frac{1}{2} \times 546 \times 2,50 \right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{2,50}{2,50} \right)^2 \right) \times 2$$

$$= 910 \text{ Kg/m}$$

Total beban mati = beban sendiri balok + beban ekuivalen

$$= 168 + 910 = 1078 \text{ Kg/m}$$

Beban Hidup (Live Load)

Beban ekuivalen $= \left(\frac{1}{2} \times ql \times lx \right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{lx}{ly} \right)^2 \right) \times 2$

$$= \left(\frac{1}{2} \times 192 \times 2,50 \right) \times \left(1 - \frac{1}{3} \times \left(\frac{2,50}{2,50} \right)^2 \right) \times 2$$

$$= 320 \text{ Kg/m}$$

Beban Ultimate

$Q_u = 1,2 D + 1,6 L$

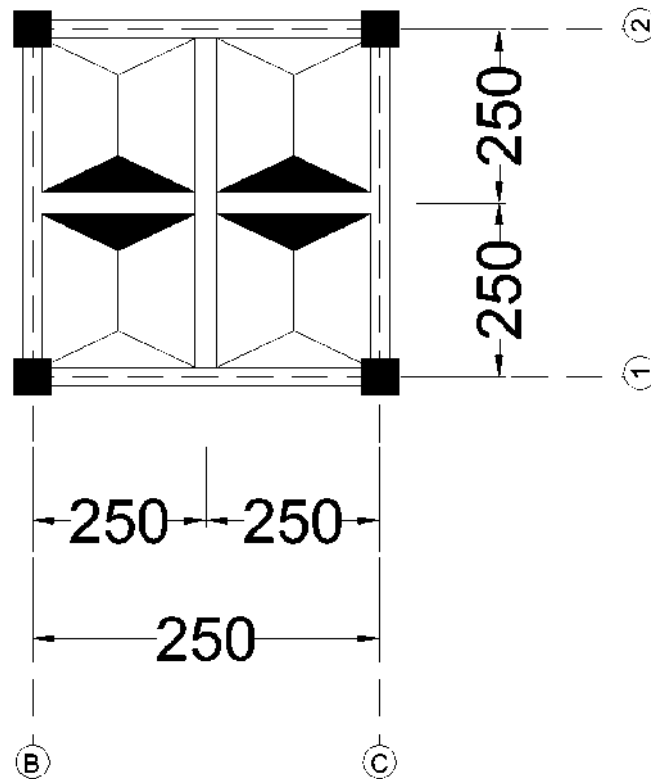
$$= 1,2 (1078) + 1,6 (320)$$

$$= 1805,6 \text{ Kg/m}$$

Perhitungan Gaya Dalam

M_{Tumpuan}	$= \frac{1}{11} Q_u l^2$	$= \frac{1}{11} \cdot 1805,6 \cdot 5^2$	$= 4103,636 \text{ Kgm}$
M_{Lapangan}	$= \frac{1}{16} Q_u l^2$	$= \frac{1}{16} \cdot 1805,6 \cdot 5^2$	$= 2821,250 \text{ Kgm}$
V_u	$= \frac{1}{2} Q_u l$	$= \frac{1}{2} \cdot 1805,6 \cdot 5$	$= 4514,000 \text{ Kgm}$

- **Pembebanan Pelat Atap Ekuivalen Segitiga Pada Balok Anak Lantai (BA 25/40 cm)**



Gambar 6. 8 Pembebanan Segitiga Pada Balok Anak Lantai (25/40)

Beban Mati (Dead Load)

Berat sendiri balok = $0,25 \times (0,40 - 0,12) \times 2400 \text{ Kg/m}^2 = 168 \text{ Kg/m}$

Beban ekuivalen = $\left(\frac{1}{3} \times qd \times lx\right) \times 2$
 $= \left(\frac{1}{3} \times 546 \times 2,50\right) \times 2$
 $= 910 \text{ Kg/m}$

Total beban mati = beban sendiri balok + beban ekuivalen
 $= 168 + 910 = 1078 \text{ Kg/m}$

Beban Hidup (Live Load)

Beban ekuivalen = $\left(\frac{1}{3} \times ql \times lx\right) \times 2$
 $= \left(\frac{1}{3} \times 192 \times 2,50\right) \times 2$
 $= 320 \text{ Kg/m}$

Beban Ultimate

$Qu = 1,2 D + 1,6 L$

$$= 1,2 (1078) + 1,6 (320)$$

$$= 1805,6 \text{ Kg/m}$$

Perhitungan Gaya Dalam

$$M_{\text{Tumpuan}} = \frac{1}{11} Q_u l^2 = \frac{1}{11} \cdot 1805,6 \cdot 5^2 = 4103,636 \text{ Kgm}$$

$$M_{\text{Lapangan}} = \frac{1}{16} Q_u l^2 = \frac{1}{16} \cdot 1805,6 \cdot 5^2 = 2821,250 \text{ Kgm}$$

$$V_u = \frac{1}{2} Q_u l = \frac{1}{2} \cdot 1805,6 \cdot 5 = 22570 \text{ Kgm}$$

Dari pembebanan untuk Balok Anak diatas, diambil beban terbesar yaitu dengan jenis pembebanan segitiga.

$$M_{\text{Tumpuan}} = \frac{1}{11} Q_u l^2 = \frac{1}{11} \cdot 1805,6 \cdot 5^2 = 4103,636 \text{ Kgm}$$

$$M_{\text{Lapangan}} = \frac{1}{16} Q_u l^2 = \frac{1}{16} \cdot 1805,6 \cdot 5^2 = 2821,250 \text{ Kgm}$$

$$V_u = \frac{1}{2} Q_u l = \frac{1}{2} \cdot 1805,6 \cdot 5 = 4514,000 \text{ Kgm}$$

6.5.2. Penulangan Lentur Balok Anak Lantai (BA 25/40 cm)

• Data Perencanaan

$$\text{Mutu beton } (f'_c) = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Dimensi balok} = 25/40 \text{ cm}$$

$$\text{Tebal selimut beton} = 40 \text{ mm (SNI 2847:2019 Tabel 20.6.1.3.1)}$$

$$\text{BJTS 420A} = \text{Tulangan utama } (f_y 420 \text{ MPa}) = D13 \text{ mm}$$

$$\text{BJTP 280} = \text{Tulangan sengkang } (f_y 280 \text{ MPa}) = \emptyset 8 \text{ mm}$$

Lebar efektif balok anak lantai:

$$d = h - s - \left(\frac{1}{2} D_{\text{tul.utama}}\right) - \emptyset_{\text{tul.segkang}} = 400 - 40 - \left(\frac{1}{2} \cdot 13\right) - 8 = 346 \text{ mm}$$

$$d' = s - \left(\frac{1}{2} D_{\text{tul.utama}}\right) + \emptyset_{\text{tul.segkang}} = 40 + \left(\frac{1}{2} \cdot 13\right) + 8 = 55 \text{ mm}$$

• Syarat Batas

Syarat batas penulangan pada balok anak lantai rencana harus sesuai dengan SNI 2847:2019 Tabel 22.2.2.4.3 hal 478 karena $f'_c = 35 \text{ MPa}$, maka menggunakan $28 < f'_c < 55$. Sehingga dapat diperhitungkan sebagai berikut:

$$\beta = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05 (35 - 28)}{7} = 0,8$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot B}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,8}{420} \left(\frac{600}{600 + 420} \right) = 0,0333$$

$$\rho_{\text{max}} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0333 = 0,0249$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{420} = 0,0033$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f_c'} = \frac{420}{0,85 \times 35} = 14,11$$

• Daerah Tumpuan

$$M_u = 4103,636 \text{ Kgm} = 41036360 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{Mu}{\phi} = \frac{41036360}{0,8} = 51295450 \text{ Nmm}$$

$$X_{\max} = 0,75 \cdot \frac{600 \cdot d}{600 + f} = 0,75 \cdot \frac{600 \cdot 346}{600 + 420} = 152,64 \text{ mm}$$

Digunakan $X = 120 \text{ mm}$

$$A_{sc} = \frac{0,85 \cdot f_c' \cdot \beta \cdot b \cdot x}{f_y} = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,8 \cdot 250 \cdot 120}{420} = 1700 \text{ mm}^2$$

$$M_{nc} = A_{sc} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\beta \cdot x}{2} \right) = 1700 \cdot 420 \cdot \left(346 - \frac{0,8 \cdot 120}{2} \right) = 212772000 \text{ Nmm}$$

$$M_{ns} = M_n - M_{nc} = 51295450 - 212772000 = -161476550 \text{ Nmm}$$

$M_{ns} \leq 0$, maka tidak perlu tulangan tekan dan hanya didesain dengan tulangan tunggal.

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{51295450}{250 \cdot 346^2} = 1,713 \text{ N/mm}^3$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 1,713}{420}} \right) = 0,0042$$

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,0042 > \rho_{\min} = 0,0033 \text{ (dipakai } \rho_{\text{perlu}} = 0,0042)$$

Tulangan tumpuan atas :

$$A_{s \text{ Perlu}} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d = 0,0042 \cdot 250 \cdot 346 = 363,3 \text{ mm}^2$$

Dipakai 3D13 ($A_s = 398 \text{ mm}^2$)

Tulangan tumpuan bawah :

$$A_{s'} = \delta \cdot A_{s \text{ pakai}} = 0,5 \times 398 = 199 \text{ mm}^2$$

Dipakai 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

Kontrol tulangan :

$$a = \frac{A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{398 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 250} = 22,475$$

$$M_n = A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 398 \cdot 420 \cdot \left(346 - \frac{22,475}{2} \right) = 55958899,5 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 55958899,5 \text{ Nmm} > M_n \text{ awal} = 51295450 \text{ Nmm (OK)}$$

• Daerah Lapangan

$$M_u = 2821,250 \text{ Kgm} = 28212500 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{Mu}{\phi} = \frac{28212500}{0,8} = 35265625 \text{ Nmm}$$

$$X_{\max} = 0,75 \cdot \frac{600 \cdot d}{600 + f_y} = 0,75 \cdot \frac{600 \cdot 346}{600 + 420} = 152,64 \text{ mm}$$

Digunakan $X = 120 \text{ mm}$

$$A_{sc} = \frac{0,85 \cdot f_c' \cdot \beta \cdot b \cdot x}{f_y} = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,8 \cdot 250 \cdot 120}{420} = 1700 \text{ mm}^2$$

$$M_{nc} = A_{sc} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\beta \cdot x}{2} \right) = 1700 \cdot 420 \cdot \left(346 - \frac{0,8 \cdot 120}{2} \right) = 212772000 \text{ Nmm}$$

$$M_{ns} = M_n - M_{nc} = 35265625 - 212772000 = -177506375 \text{ Nmm}$$

$M_{ns} \leq 0$, maka tidak perlu tulangan tekan dan hanya didesain dengan tulangan tunggal.

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{35265625}{250 \cdot 346^2} = 1,178 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 1,178}{420}} \right) = 0,0028$$

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,0028 < \rho_{\min} = 0,0033 \text{ (dipakai } \rho_{\min} = 0,0033)$$

Tulangan lapangan bawah:

$$A_s \text{ Perlu} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 250 \cdot 446 = 367,95 \text{ mm}^2$$

Dipakai 3D13 ($A_s = 398 \text{ mm}^2$)

Tulangan lapangan atas :

$$A_s' = \delta \cdot A_s \text{ pakai} = 0,5 \times 398 = 199 \text{ mm}^2$$

Dipakai 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

Kontrol tulangan :

$$a = \frac{A_s \text{ pakai} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{398 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 250} = 22,475$$

$$M_n = A_s \text{ pakai} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 398 \cdot 420 \cdot \left(346 - \frac{22,475}{2} \right) = 55958899,5 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 55958899,5 \text{ Nmm} > M_n \text{ awal} = 35265625 \text{ Nmm (OK)}$$

Maka dipakai tulangan lentur balok anak lantai (BA 25/40) untuk daerah tumpuan dan lapangan adalah :

Tulangan lentur daerah tumpuan : Atas : 3D13 ($A_s = 398 \text{ mm}^2$) & Bawah : 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

Tulangan lentur daerah lapangan : Bawah : 3D13 ($A_s = 398 \text{ mm}^2$) & Atas : 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

6.5.3. Penulangan Geser Balok Anak Lantai (BA 25/40)

- **Daerah Tumpuan**

Beban geser terfaktor (V_u) = 4514,000 Kg = 45140,00 N

$$\text{Kekuatan geser beton (Vc)} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{35} \cdot 250 \cdot 346 = 85290,15 \text{ N}$$

Kategori desain :

$\emptyset Vc$	$= 0,75 \times 85290,15$	$= 63967,61 \text{ N}$
$\frac{1}{2} \cdot \emptyset Vc$	$= \frac{1}{2} \times 63967,61$	$= 31983,80 \text{ N}$
$Vs = \frac{1}{3} \cdot bw \cdot d$	$= \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 346$	$= 28833,33 \text{ N}$
$\emptyset Vs$	$= 0,75 \times 28833,33$	$= 21624,99 \text{ N}$
$\emptyset Vc + \emptyset Vs$	$= 63967,61 + 21624,99$	$= 85592,60 \text{ N}$
$\text{Min. } \emptyset Vs$	$= 0,6 \times 21624,99$	$= 12974,99 \text{ N}$
$\emptyset Vc + \text{min } \emptyset Vs$	$= 63967,61 + 12974,99$	$= 76942,60 \text{ N}$
$\emptyset \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c} \cdot bw \cdot d$	$= 0,6 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 346$	$= 102348,18 \text{ N}$
$\emptyset Vc + \emptyset \cdot \frac{1}{3} \sqrt{f'c} \cdot bw \cdot d$	$= 63967,61 + 102348,18$	$= 166315,79 \text{ N}$
$\emptyset \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c} \cdot bw \cdot d$	$= 0,6 \times \frac{2}{3} \sqrt{35} \times 250 \times 346$	$= 204696,36 \text{ N}$
$\emptyset Vc + \emptyset \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c} \cdot bw \cdot d$	$= 63967,61 + 204696,36$	$= 268663,96 \text{ N}$

Kategori desain :

Untuk $V_u = 45140,00 \text{ N}$, maka termasuk dalam kategori desain ke – 2, dimana

$$(\frac{1}{2} \cdot \emptyset Vc) < V_u < \emptyset Vc = 31983,80 \text{ N} < 45140,00 \text{ N} < 63967,61 \text{ N}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{346}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq 173 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm}$$

Direncanakan sengkang dengan jarak $S=120 \text{ mm}$

Maka luas penampang adalah :

$$A_{v_{\min}} = \frac{bw \cdot S}{3 \cdot f_y} = \frac{250 \times 120}{3 \times 280} = 35,71 \text{ mm}^2$$

Dipakai sengkang 2 kaki $\emptyset 8 \text{ mm}$:

$$A_v = n \cdot \frac{1}{4} \pi d^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48 \text{ mm}^2 > 35,71 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gaya perlawanan sengkang :

$$\emptyset V_s = \frac{\emptyset A_v \cdot f_y \cdot d}{S} = \frac{0,75 \cdot 100,48 \cdot 280 \cdot 346}{120} = 60840,64 \text{ N} > 12974,99 \text{ N (OK)}$$

• Daerah Lapangan

Beban geser terfaktor (V_u) = 4514,000 Kg = 45140,00 N

$$\text{Kekuatan geser beton (Vc)} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{35} \cdot 250 \cdot 346 = 85290,15 \text{ N}$$

Kategori desain :

$$\begin{aligned}
 \emptyset V_c &= 0,75 \times 85290,15 &= 63967,61 \text{ N} \\
 \frac{1}{2} \cdot \emptyset V_c &= \frac{1}{2} \times 63967,61 &= 31983,80 \text{ N} \\
 V_s = \frac{1}{3} \cdot b_w \cdot d &= \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 346 &= 28833,33 \text{ N} \\
 \emptyset V_s &= 0,75 \times 28833,33 &= 21624,99 \text{ N} \\
 \emptyset V_c + \emptyset V_s &= 63967,61 + 21624,99 &= 85592,60 \text{ N} \\
 \text{Min. } \emptyset V_s &= 0,6 \times 21624,99 &= 12974,99 \text{ N} \\
 \emptyset V_c + \text{min } \emptyset V_s &= 63967,61 + 12974,99 &= 76942,60 \text{ N} \\
 \emptyset \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d &= 0,6 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 346 &= 102348,18 \text{ N} \\
 \emptyset V_c + \emptyset \cdot \frac{1}{3} \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d &= 63967,61 + 102348,18 &= 166315,79 \text{ N} \\
 \emptyset \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d &= 0,6 \times \frac{2}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 346 &= 204696,36 \text{ N} \\
 \emptyset V_c + \emptyset \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d &= 63967,61 + 204696,36 &= 268663,96 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Kategori desain :

Untuk $V_u = 45140,00 \text{ N}$, maka termasuk dalam kategori desain ke – 2, dimana

$$(\frac{1}{2} \cdot \emptyset V_c) < V_u < \emptyset V_c = 31983,80 \text{ N} < 45140,00 \text{ N} < 63967,61 \text{ N}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{346}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq 173 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm}$$

Direncanakan sengkang dengan jarak $S=150 \text{ mm}$

Maka luas penampang adalah :

$$A_{v_{\min}} = \frac{b_w S}{3 f_y} = \frac{250 \times 150}{3 \times 280} = 44,64 \text{ mm}^2$$

Dipakai sengkang 2 kaki $\emptyset 8 \text{ mm}$:

$$A_v = n \frac{1}{4} \pi d^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48 \text{ mm}^2 > 44,64 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gaya perlawanan sengkang :

$$\emptyset V_s = \frac{\emptyset A_v \cdot f_y \cdot d}{S} = \frac{0,75 \cdot 100,48 \cdot 280 \cdot 346}{150} = 48672,51 \text{ N} > 12974,99 \text{ N (OK)}$$

Maka dipakai tulangan geser balok anak lantai (BA 25/40) untuk daerah tumpuan dan lapangan adalah :

Tulangan geser daerah tumpuan : $\emptyset 8 - 120 \text{ mm}$

Tulangan geser daerah lapangan : $\emptyset 8 - 150 \text{ mm}$

Tabel 6. 3 Rekapitulasi Penulangan Balok Anak dan Balok Lantai

Tipe	Dimensi (mm)	Tulangan	Tumpuan	Lapangan
Balok Anak Atap	25/40	Atas	3D13	2D13
		Bawah	2D13	3D13
		Sengkang	Ø8 - 120	Ø8 - 150
Balok Anak Lantai	25/40	Atas	3D13	2D13
		Bawah	2D13	3D13
		Sengkang	Ø8 - 120	Ø8 - 150

6.6. Perencanaan Tangga

Dalam perencanaan tangga pada gedung apartemen Az-Zahr, terdapat beberapa data perencanaan, sebagai berikut :

- **Tangga**

Selisih tinggi lantai = 4.0 m

Panjang tangga = 4,20

Lebar tangga = 2,70

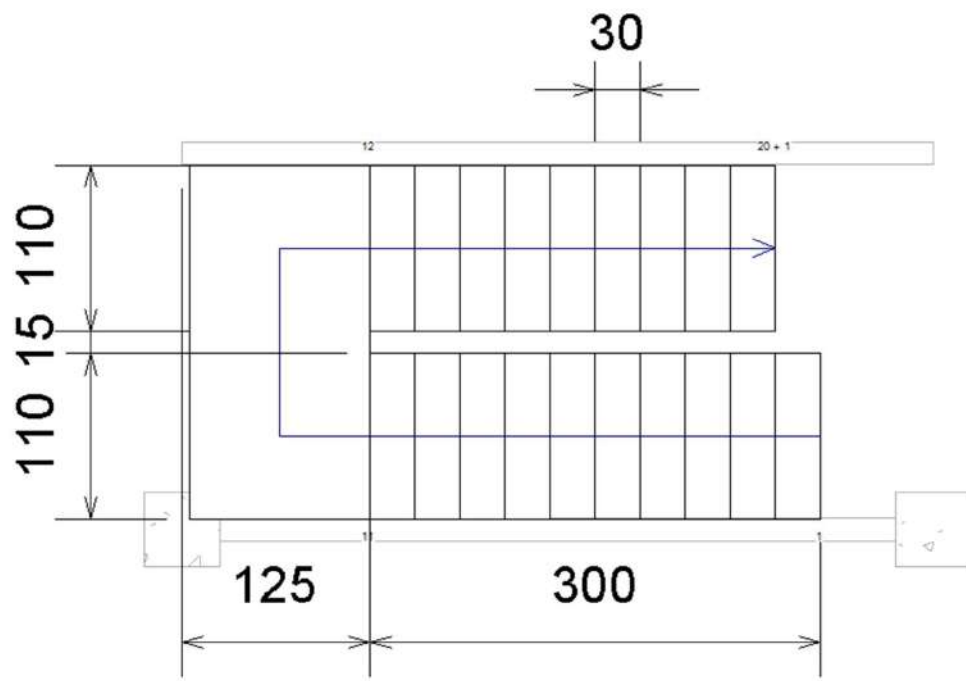
Panjang bordes = 2.50

Lebar bordes = 1,50

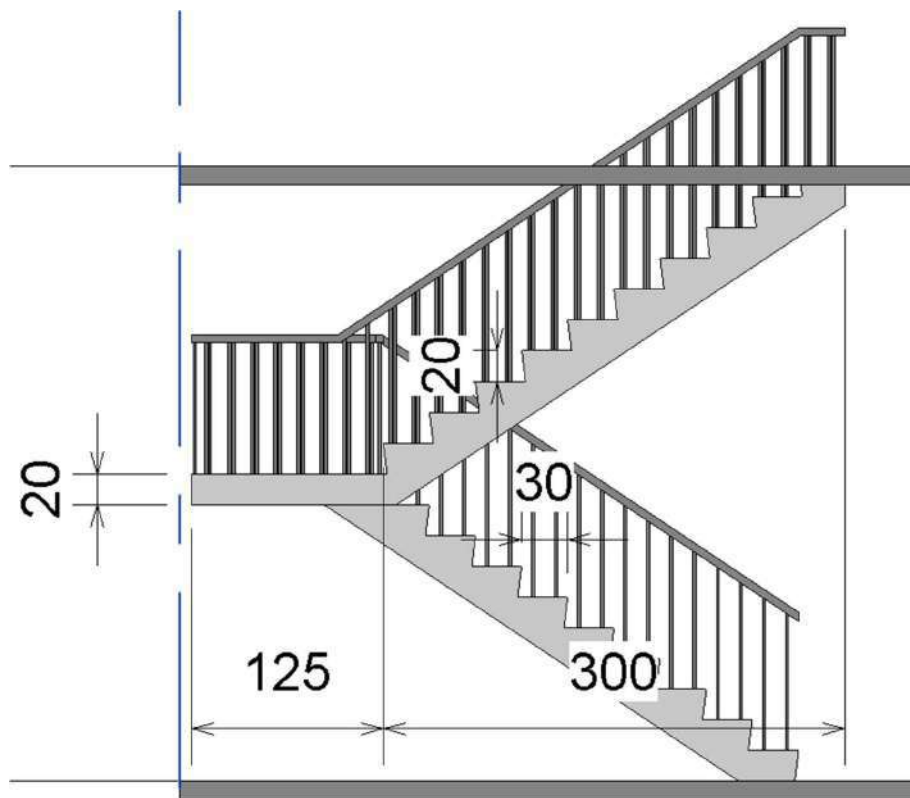
Elevai bordes = 2,00

Mutu beton ($f'c$) = 35 MPa

Mutu baja (f_y) = 420 MPa



(a)



(b)

Gambar 6. 9 (a) Denah Tangga (b) Sket Tangga Tampak samping

- **Hitungan Tangga**

Lebar anak tangga = 30 cm

Tinggi anak tangga = 20 cm

Panjang miring = 265 cm

$$\text{Jumlah injakan tangga} = \frac{\text{elevasi bordes}}{\text{tinggi anak tangga}} = \frac{200}{20} = 10 \text{ buah}$$

$$\text{Kemiringan pada tangga} = \arctan \left(\frac{\text{tinggi injakan}}{\text{lebar injakan}} \right) = \arctan \left(\frac{20}{30} \right) = 33,69^\circ \leq 40^\circ \text{ (OK)}$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot h \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot \cos 33,69^\circ = 8,32 \text{ cm}$$

- **Hitungan Tebal Pelat Tangga**

Tebal selimut beton = 20 cm

$$H_{\min} = \frac{ln}{28} \left(0,4 + \frac{fy}{700} \right) = \frac{265}{28} \left(0,4 + \frac{420}{700} \right) = 9,4 \text{ cm}$$

Digunakan h = 15 cm

6.6.1. Pembebanan Tangga

- **Beban Plat Tangga**

Beban Mati (Dead Load)

$$\text{Berat sendiri} = (0,15 \times 2400 \times (1/\cos 33,69^\circ)) \times 1,5 = 634,83 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Berat anak tangga} = 0,0832 \times 1,5 \times 2400 = 299,52 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Spesi (2 cm)} = 0,02 \times 2100 \times 1,5 = 63,00 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Keramik (1 cm)} = 0,01 \times 2100 \times 1,5 = 36,00 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Berat sandaran} = 30 = 30,00 \text{ Kg/m} +$$

$$\text{Jumlah beban mati (qd)} = 1063,35 \text{ Kg/m}$$

Beban Hidup (Live Load)

Berdasarkan SNI 1727;2020 Tabel 4.3.1. untuk tangga dan jalan keluar harus direncanakan agar dapat menahan beban hidup merata sebesar 488,44 Kg/m.

Kombinasi Pembebanan

$$Q_u = 1,2 D + 1,6 L = 1,2 (1063,35) + 1,6 (488,44)$$

$$= 2051,12 \text{ Kg/m}$$

- **Beban Pelat Bordes**

Beban Mati (Dead Load)

$$\text{Berat sendiri} = 0,15 \times 1,5 \times 2400 = 540,00 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Spesi (2 cm)} = 0,02 \times 2100 \times 1,5 = 63,00 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Keramik (1 cm)} = 0,01 \times 2100 \times 1,5 = 36,00 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Berat sandaran} = 30 = 30,00 \text{ Kg/m} +$$

$$\text{Jumlah beban mati (qd)} = 669,00 \text{ Kg/m}$$

Beban Hidup (Live Load)

Berdasarkan SNI 1727;2020 Tabel 4.3.1. untuk tangga dan jalan keluar harus direncanakan agar dapat menahan beban hidup merata sebesar 488,44 Kg/m.

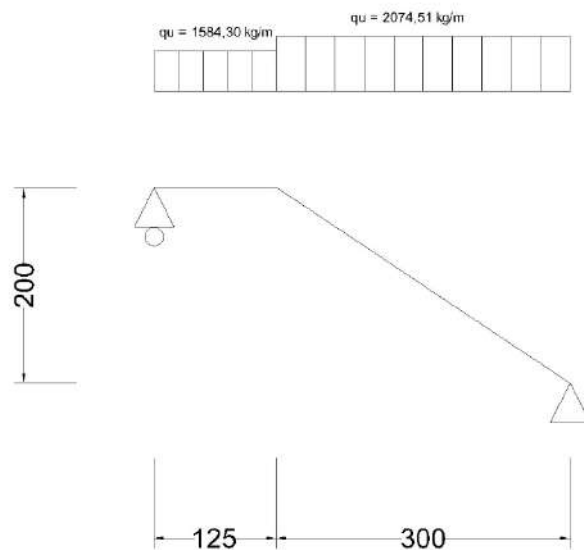
Kombinasi Pembebanan

$$Q_u = 1,2 D + 1,6 L = 1,2 (669,00) + 1,6 (488,44)$$

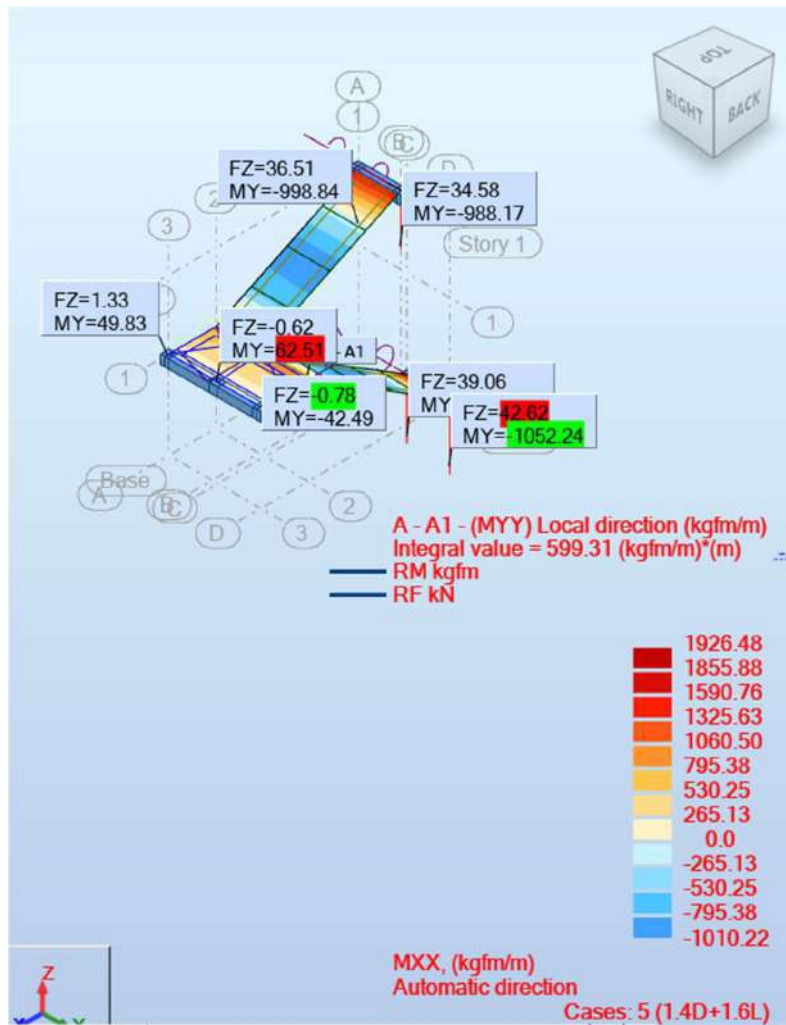
$$= 1584,30 \text{ Kg/m}$$

6.6.2. Analisa Statika Tangga

Setelah dilakukannya perhitungan pembebanan, maka selanjutnya untuk mencari momen-momen (gaya- gaya dalam) dicari dengan menggunakan program bantu komputer (*Robot Structural Analysis Professional*).



Gambar 6. 10 Sket Pembebanan Tangga



Gambar 6. 11 Analisa Statik Tangga

Tabel 6. 4 Perletkan Momen Tangga

TABLE ELEMENT FORCES – AREA SHELLS	
Panel/Nodes/Case	Mxx (kgfm/m)
9/ 11/ 5 (C)	1926.48

Tabel 6. 5 Perletakan Momen Bordes

TABLE ELEMENT FORCES – AREA SHELLS	
Panel/Nodes/Case	Myy (kgfm/m)
10/ 5/ 5 (C)	398.99

Dari analisa perhitungan menggunakan program struktur, maka diperoleh hasil :

M_u tangga : 1926.48 Kgm

M_u bordes : 398.99Kgm

- **Gaya dalam pada tangga**

Momen yang terjadi (M_u) = 1926.48 Kgm

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{1926.48}{0.9} = 2140,53 \text{ Kgm} = 21405300 \text{ Nmm}$$

- **Gaya dalam pada bordes**

Momen yang terjadi (M_u) = 398.99 Kgm

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{398.99}{0.9} = 443, 32 \text{ Kgm} = 443200 \text{ Nmm}$$

6.6.3. Penulangan Plat Tangga

Mutu beton (f'_c) = 35 MPa

Tebal selimut beton = 20 mm

Diameter tulangan = D10

Mutu baja (f_y) = 420 MPa

M_n = 2140530 Nmm

- **Syarat Batas**

Dengan nilai β_1 untuk $28 \text{ MPa} < f'_c < 55 \text{ MPa}$ berdasarkan **Tabel 22.2.2.4.3 SNI**

2847:2019 dihitung sebagai berikut :

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05 (35 - 28)}{7} = 0,80$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,80}{420} \cdot \left(\frac{600}{600 + 420} \right) = 0,033$$

$$\rho_{max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,033 = 0,024$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{420} = 0,0033$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f'_c} = \frac{420}{0,85 \cdot 35} = 14,11$$

$$d = (h - s - \frac{1}{2} \phi) = 150 - 20 - (\frac{1}{2} \cdot 13) = 123,5$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{21405300}{1000 \cdot 123,5^2} = 1,40 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 1,40}{420}} \right) = 0,0033$$

$$\rho_{min} = 0,0033 \leq \rho_{perlu} = 0,0033 < \rho_{max} = 0,024 \text{ maka dipakia } (\rho_{perlu} = 0,0033)$$

- **Tulangan Perlu**

$$A_{s \text{ Perlu}} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 1000 \cdot 123,5 = 407,55 \text{ mm}^2$$

Dipakai D10-175 ($A_s = 448,8 \text{ mm}^2$)

- **Tulangan Susut**

$$A_{s \text{ Perlu}} = 0,002 \cdot b \cdot h = 0,002 \cdot 1000 \cdot 150 = 300 \text{ mm}^2$$

Dipakai $\phi 8-15$ ($A_s = 335,1 \text{ mm}^2$)

- **Kontrol Pelat Tangga**

$$a = \frac{A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{448,8 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 1000} = 6,34$$

$$M_n = A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 448,8 \cdot 420 \left(123,5 - \frac{6,34}{2} \right) = 22681723,68 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 22681723,68 \text{ Nmm} > M_{n \text{ awal}} 21405300 \text{ Nmm (OK)}$$

Jarak tulangan $\leq 3 \times$ tebal pelat

$$175 \leq 3 \times 150$$

$$175 \text{ mm} \leq 450 \text{ mm (OK)}$$

Tulangan susut :

$$A_{ss \text{ pakai}} = \frac{1}{4} \cdot \phi^2 \cdot \pi \cdot \frac{b}{s} = \frac{1}{4} \cdot 8^2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1000}{150} = 335,10 \text{ mm}^2 > A_{ss \text{ perlu}} = 300 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

6.6.4. Penulangan Plat Bordes

- **Data Perencanaan**

$$\text{Mutu beton } (f_c') = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Tebal selimut beton} = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter tulangan} = D10$$

$$\text{Mutu baja } (f_y) = 420 \text{ MPa}$$

$$M_n = 443200 \text{ Nmm}$$

- **Syarat Batas**

Dengan nilai β_1 untuk $28 \text{ MPa} < f_c' < 55 \text{ MPa}$ berdasarkan **Tabel 22.2.2.4.3 SNI**

2847:2019 dihitung sebagai berikut :

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f_c' - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05 (f_c' - 28)}{7} = 0,80$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f_c' \cdot \beta_1}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 +} \right) = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,80}{420} \cdot \left(\frac{600}{60} \right) = 0,033$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,033 = 0,024$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{420} = 0,0033$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f_c'} = \frac{420}{0,85 \cdot 35} = 14,11$$

$$d = (h - s - \frac{1}{2} \phi) = 150 - 20 - (\frac{1}{2} \cdot 13) = 123,5$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{443200}{1000 \cdot 123,5^2} = 0,03 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 0,03}{420}} \right) = 0,0007$$

$$\rho_{min} = 0,0033 > \rho_{perlu} = 0,0007 < \rho_{max} = 0,024 \text{ maka dipakai } (\rho_{min} = 0,0033)$$

- **Tulangan Perlu**

$$A_{s \text{ Perlu}} = \rho_{min} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 1000 \cdot 123,5 = 407,55 \text{ mm}^2$$

Dipakai D10 – 175 ($A_s = 448,8 \text{ mm}^2$)

Tulangan Susut

$$A_{s \text{ Perlu}} = 0,002 \cdot b \cdot h = 0,002 \cdot 1000 \cdot 150 = 300 \text{ mm}^2$$

Dipakai Ø8 – 150 ($335,1 \text{ mm}^2$)

- **Kontrol Pelat Bordes**

$$a = \frac{A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{448,8 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 1000} = 6,34$$

$$M_n = A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 448,8 \cdot 420 \left(123,5 - \frac{6,34}{2} \right) = 22681723 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 22681723 \text{ Nmm} > M_{n \text{ awal}} 443200 \text{ Nmm (OK)}$$

Jarak tulangan $\leq 3 \times$ tebal pelat

$$175 \leq 3 \times 150$$

$$175 \text{ mm} \leq 450 \text{ mm (OK)}$$

Tulangan susut :

$$A_{ss \text{ pakai}} = \frac{1}{4} \cdot \phi^2 \cdot \pi \cdot \frac{b}{s} = \frac{1}{4} \cdot 8^2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1000}{150} = 334,93 \text{ mm}^2 > A_{ss \text{ perlu}} = 300 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

6.6.5. Perencanaan Balok Bordes

- **Dimensi Balok Bordes**

$$h = \frac{l}{16} = \frac{250}{16} = 15,62 \text{ cm}$$

$$b_w = 0,3h \cdot 15,62 = 4,68 \text{ cm}$$

- **Pembebanan Balok Bordes**

$$\text{Berat sendiri balok} = 0,25 \times 0,40 \times 2400 = 240 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Beban bekerja pada pelat bordes} = 1584,30 = 1584,30 \text{ Kg/m}$$

Kombinasi pembebanan :

$$Q_u = 1,2 D + 1,6 L = 1,2 (240) + 1,6 (1584,30) = 2822,88 \text{ Kg/m}$$

- **Perhitungan Momen Yang Bekerja**

$$M_{\text{Tumpuan}} = \frac{1}{11} \cdot Qu \cdot l^2 = \frac{1}{11} \cdot 2822,88 \cdot 2,5^2 = 1603,90 \text{ Kg.m}$$

$$M_{\text{Lapangan}} = \frac{1}{16} \cdot Qu \cdot l^2 = \frac{1}{16} \cdot 2822,88 \cdot 2,5^2 = 1102,68 \text{ Kg.m}$$

$$Vu = \frac{1}{2} \cdot Qu \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 2822,88 \cdot 2,5 = 3528,60 \text{ Kg.m}$$

- **Penulangan Lentur Balok Bordes**

$$\text{Mutu beton } (f'c) = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Tebal selimut beton} = 40 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter tulangan} = D10$$

$$\text{Tulangan sengkang} = \emptyset 8$$

$$\text{Mutu baja } (fy) = 420 \text{ Mpa}$$

Syarat Batas

Dengan nilai β_1 untuk $28 \text{ MPa} < f'c < 55 \text{ MPa}$ berdasarkan **Tabel 22.2.2.4.3 SNI 2847:2019** dihitung sebagai berikut :

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05(f'c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05(f'c - 2)}{7} = 0,80$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'c \cdot \beta_1}{fy} \cdot \left(\frac{600}{60} \right) = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,80}{420} \cdot \left(\frac{600}{600 + 420} \right) = 0,033$$

$$\rho_{max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,033 = 0,024$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{fy} = \frac{1,4}{420} = 0,0033$$

$$m = \frac{fy}{0,85 \cdot f'c} = \frac{420}{0,85 \cdot 35} = 14,11$$

Daerah Tumpuan

$$d = h - s - D_{\text{tul.utama}} - \left(\frac{1}{2} \emptyset_{\text{tul.sengkang}} \right) = 400 - 40 - 10 - \left(\frac{1}{2} \cdot 8 \right) = 346 \text{ mm}$$

$$Mu = 1603,90 \text{ Kg.m} = 16039000 \text{ Nmm}$$

$$Mn = \frac{Mu}{\phi} = \frac{16039000}{0,8} = 20048750 \text{ Nmm}$$

$$Rn = \frac{Mn}{b \cdot d^2} = \frac{20048750}{250 \cdot 346^2} = 0,68$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{fy}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 0,68}{420}} \right) = 0,0016$$

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,0016 < \rho_{min} = 0,0033 < \rho_{max} = 0,024 \text{ maka dipakai } (\rho_{min} = 0,0033)$$

Tulangan tumpuan atas :

$$As_{\text{Perlu}} = \rho_{min} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 250 \cdot 343 = 282,98 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai 4D10 } (As = 314,16 \text{ mm}^2)$$

Tulangan tumpuan bawah :

$$A_s' = \delta \cdot A_s \text{ pakai} = 0,5 \cdot 393 = 196,5 \text{ mm}^2$$

Dipakai 2D13 ($A_s = 265 \text{ mm}^2$)

Daerah Lapangan

$$d = h - s - D_{\text{tul. utama}} - \left(\frac{1}{2} \phi_{\text{tul. sengkang}}\right) = 400 - 40 - 10 - \left(\frac{1}{2} \cdot 8\right) = 346 \text{ mm}$$

$$M_u = 1102,68 \text{ Kg.m} = 11026800 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{11026800}{0,8} = 13783500 \text{ Nmm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{13783500}{250 \cdot 346^2} = 0,46$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}}\right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 0,46}{420}}\right) = 0,0011$$

$$\rho_{\text{perlu}} = 0,0011 < \rho_{\text{min}} = 0,0033 < \rho_{\text{max}} = 0,024 \text{ maka dipakai } (\rho_{\text{min}} = 0,0033)$$

Tulangan tumpuan bawah :

$$A_s \text{ Perlu} = \rho_{\text{min}} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 250 \cdot 346 = 285,45 \text{ mm}^2$$

Dipakai 4D10 ($A_s = 314,16 \text{ mm}^2$)

Tulangan tumpuan atas :

$$A_s' = \delta \cdot A_s \text{ pakai} = 0,5 \cdot 393 = 196,5 \text{ mm}^2$$

Dipakai 3D10 ($A_s = 235,62 \text{ mm}^2$)

• Penulangan Geser Balok Bordes

Daerah Tumpuan

$$\text{Beban geser terfaktor } (V_u) = 3528,60 \text{ Kg} = 35286,0 \text{ N}$$

$$\text{Kekuatan geser beton } (V_c) = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{35} \cdot 250 \cdot 343 = 84550,64 \text{ N}$$

Kategori desain :

$$\phi V_c = 0,75 \times 84550,64 = 63412,98 \text{ N}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \phi V_c = \frac{1}{2} \times 63412,98 = 31706,49 \text{ N}$$

$$V_s = \frac{1}{3} \cdot b \cdot w \cdot d = \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 343 = 28583,33 \text{ N}$$

$$\phi V_s = 0,75 \times 28583,33 = 21437,49 \text{ N}$$

$$\phi V_c + \phi V_s = 63412,98 + 21437,49 = 84850,47 \text{ N}$$

$$\text{Min } \phi V_s = 0,6 \times 21437,49 = 12862,49 \text{ N}$$

$$\phi V_c + \text{min } \phi V_s = 63412,98 + 12862,49 = 76275,47 \text{ N}$$

$$\phi \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b \cdot w \cdot d = 0,6 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 343 = 101460,76 \text{ N}$$

$$\phi V_c + \phi \cdot \frac{1}{3} \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d = 63412,98 + 101460,76 = 164873,74 \text{ N}$$

$$\phi \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d = 0,6 \times \frac{2}{3} \sqrt{35} \times 250 \times 343 = 202921,53 \text{ N}$$

$$\phi V_c + \phi \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d = 63412,98 + 202921,53 = 266334,51 \text{ N}$$

Kategori desain :

Untuk $V_u = 35286,0 \text{ N}$, maka termasuk dalam kategori desain ke – 2, dimana $(\frac{1}{2} \cdot \phi V_c)$

$$< V_u < \phi V_c = 31706,49 \text{ N} < 35286,0 \text{ N} < 63412,98 \text{ N}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{343}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq 171 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm}$$

Direncanakan sengkang dengan jarak $S=100 \text{ mm}$

Maka luas penampang adalah :

$$A_{v_{\min}} = \frac{b_w S}{3 f_y} = \frac{250 \times 100}{3 \times 280} = 29,76 \text{ mm}^2$$

Dipakai sengkang 2 kaki $\phi 8 \text{ mm}$:

$$A_v = n \frac{1}{4} \pi d^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48 \text{ mm}^2 > 29,76 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gaya perlawanan sengkang :

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v \cdot f_y \cdot d}{S} = \frac{0,75 \cdot 100,48 \cdot 280 \cdot 343}{100} = 72375,75 \text{ N} > \text{Min. } \phi V_s 12862,49 \text{ N (OK)}$$

Daerah Lapangan

Beban geser terfaktor (V_u) = $3528,60 \text{ Kg} = 35286,0 \text{ N}$

$$\text{Kekuatan geser beton } (V_c) = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{35} \cdot 250 \cdot 343 = 84550,64 \text{ N}$$

Kategori desain :

$$\phi V_c = 0,75 \times 84550,64 = 63412,98 \text{ N}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \phi V_c = \frac{1}{2} \times 63412,98 = 31706,49 \text{ N}$$

$$V_s = \frac{1}{3} \cdot b_w \cdot d = \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 343 = 28583,33 \text{ N}$$

$$\phi V_s = 0,75 \times 28583,33 = 21437,49 \text{ N}$$

$$\phi V_c + \phi V_s = 63412,98 + 21437,49 = 84850,47 \text{ N}$$

$$\text{Min. } \phi V_s = 0,6 \times 21437,49 = 12862,49 \text{ N}$$

$$\phi V_c + \text{min } \phi V_s = 63412,98 + 12862,49 = 76275,47 \text{ N}$$

$$\phi \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d = 0,6 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 343 = 101460,76 \text{ N}$$

$$\phi V_c + \phi \cdot \frac{1}{3} \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d = 63412,98 + 101460,76 = 164873,74 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}\phi \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d &= 0,6 \times \frac{2}{3} \sqrt{35} \times 250 \times 343 &= 202921,53 \text{ N} \\ \phi V_c + \phi \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d &= 63412,98 + 202921,53 &= 266334,51 \text{ N}\end{aligned}$$

Kategori desain :

Untuk $V_u = 35286,0 \text{ N}$, maka termasuk dalam kategori desain ke – 2, dimana $(\frac{1}{2} \cdot \phi V_c)$

$$< V_u < \phi V_c = 31706,49 \text{ N} < 35286,0 \text{ N} < 63412,98 \text{ N}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{343}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq 171 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm}$$

Direncanakan sengkang dengan jarak $S=100 \text{ mm}$

Maka luas penampang adalah :

$$A_{v_{\min}} = \frac{b_w S}{3 f_y} = \frac{250 \times 100}{3 \times 280} = 29,76 \text{ mm}^2$$

Dipakai sengkang 2 kaki $\phi 8 \text{ mm}$:

$$A_v = n \frac{1}{4} \pi d^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48 \text{ mm}^2 > 29,76 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gaya perlawanan sengkang :

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v \cdot f_y \cdot d}{S} = \frac{0,75 \cdot 100,48 \cdot 280 \cdot 343}{100} = 72375,75 \text{ N} > \text{Min. } \phi V_s 12862,49 \text{ N (OK)}$$

16

6.7. Perencanaan Balok Penggantung Lift

Perencanaan balok *lift* meliputi balok – balok yang berkaitan dengan ruang mesin *lift*, yaitu balok *penggantung lift*. *Lift* yang digunakan untuk bangunan gedung apartemen Az-Zahr menggunakan merek dari *SIGMA ELEVATOR*, dengan data – data sebagai berikut :

Brand lift = *Sigma Elevator* (ACRA)

Kapasitas = 12 orang (900 Kg)

Kecepatan = 1,5 m/s

Lebar pintu (*Open Width*) = 900 mm

Dimensi sangkar (*CarSize*) : *Outside* = 1600 x 1350 mm²

Dimensi ruang luncur (*Hoistway*) = 4500 x 2050 mm²

Dimensi ruang mesin (*Machine Room*) = 4500 x 2050 mm²

Beban reaksi ruang mesin : R1 = 50000 N = 5000 Kg

R2 = 28000 N = 2800 Kg

7

6.7.1. Koefisien Kejut Beban Hidup Oleh Crane

Balok penggantung *lift* memikul beban *crane* yang ditambah dengan berat pada muatan yang diangkat. Perhitungan beban rencana balok penggantung *lift* perlu ditambahkan beban *crane* dengan koefisien seperti rumus dibawah:

$$\Psi = (1 + k_1 \times k_2 \times V) \geq 1,15$$

$$\Psi = (1 + k_1 \times k_2 \times V) \geq 1,15$$

$$\Psi = 1,78 \geq 1,15$$

Dimana :

Ψ = Koefisien kejut yang nilainya tidak boleh diambil kurang dari 1,15

K_1 = Koefisien yang tergantung pada kekuatan keran induk. Untuk keran induk dengan struktur rangka pada umumnya nilai k_1 diambil sebesar 0,6

K_2 = Koefisien yang tergantung pada sifat – sifat mesin angkat dari keran angkatnya, dapat diambil sebesar 1,3

V = Kecepatan angkat maksimum (m/dt) pada pengangkatan muatan maksimum dalam keran induk dan keran angkat yang paling menentukan bagi struktur yang ditinjau dan nilai V tidak perlu lebih dari 1,00 m/dt

Jadi, balok yang bekerja pada balok penggantung adalah :

$$P_{u1} = R_1 \times \Psi = 5000 \times 1,78 = 8900 \text{ Kg}$$

$$P_{u2} = R_2 \times \Psi = 2800 \times 1,78 = 4984 \text{ Kg}$$

$$P = 8900 + 4984 = 13884 \text{ Kg}$$

6.7.2. Pembebanan Balok Penggantung Lift

Adapun pembebanan untuk balok penggantung *lift* terdiri dari beban merata dan beban terpusat sebagai berikut:

Beban Mati (Dead Load)

$$\text{Berat sendiri balok} = 0,25 \times 0,40 \times 2400 \times 5 = 1200 \text{ Kg/m}$$

Beban Hidup (Live Load)

$$\text{Beban bekerja} = 100 = 100 \text{ Kg/m}^2$$

Beban Ultimate

$$Q_u = 1,2 (1200) + 1,6 (100) = 1600 \text{ Kg/m}$$

Beban Terpusat (P)

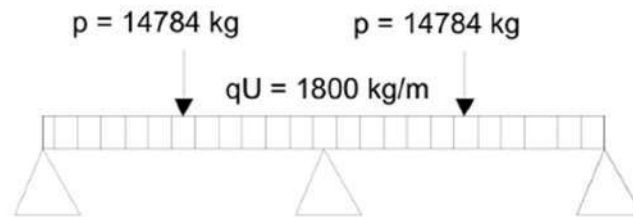
$$\text{Beban terpusat lift} = 13884 = 13884 \text{ Kg}$$

$$\text{Beban kapasitas lift} = 900 = 900 \text{ Kg} +$$

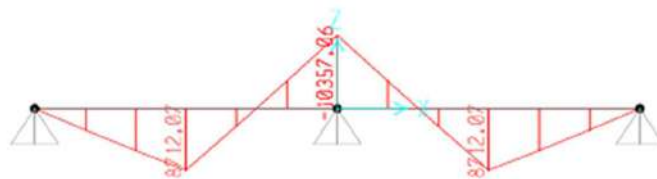
$$\text{Total beban terpusat} = 14784 \text{ Kg}$$

6.7.3. Analisa Statik Balok Lift

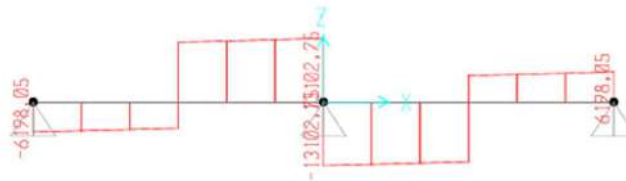
Statika pembebanan pada balok penggantung lift digambarkan pada Gambar 5.10. Analisa gaya-gaya dalam menggunakan program bantu dan didapatkan gaya momen lentur (M_u) seperti pada Gambar 5.2 serta gaya geser (V_u) seperti pada Gambar 5.3 Untuk *Output* untuk pembebanan balok penggantung lift ditampilkan pada Gambar 5.4 Dan Gambar 5.5



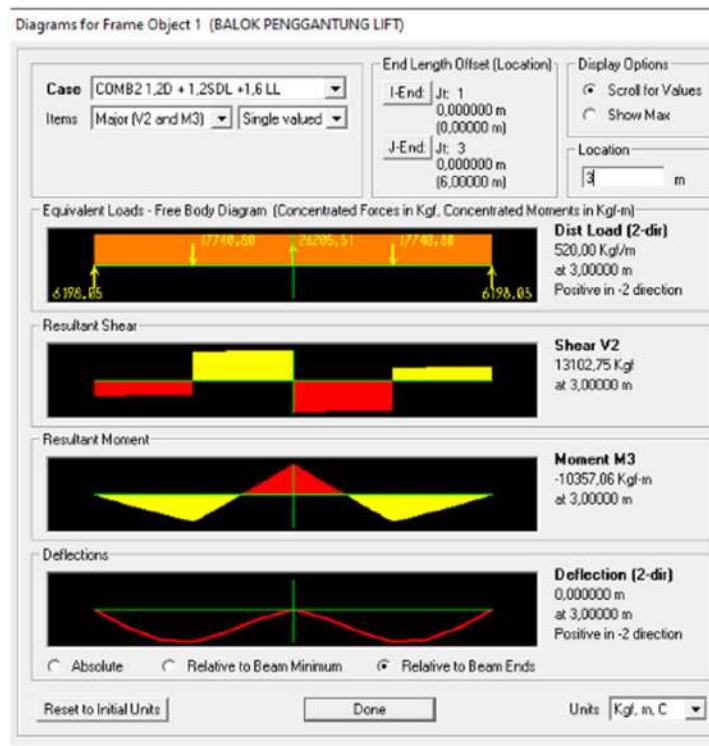
Gambar 6. 12 Statika Pembebanan



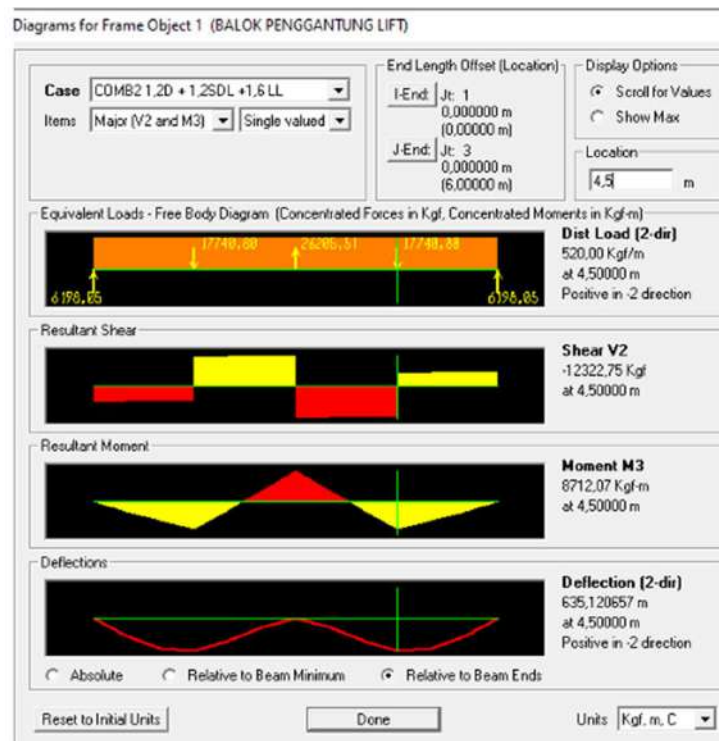
Gambar 6. 13 Momen Lentur (M_u) Pada Balok Penggantung Lift



Gambar 6. 14 Gaya Geser (V_u) Pada Balok Penggantung Lift



Gambar 6. 15 Gaya Dalam Lapangan Balok Penggantung Lift



Gambar 6. 16 Gaya Dalam Tumpuan Balok Penggantung Lift

Dari analisa perhitungan menggunakan program bantu SAP2000 yang telah dilakukan, maka diperoleh hasil sebagai berikut :

- Mu tumpuan = 10357,06 Kgm
- Mu lapangan = 8712,07 Kgm
- Vu = 13102,75 Kgm

6.7.4. Penulangan Balok Penggantung Lift

• Penulangan Lentur Balok Penggantung *Lift*

Data Perencanaan

Mutu beton ($f'c$) = 35 MPa

Dimensi balok = 25/40

Tebal selimut beton = 40 mm

Tulangan Utama (f_y 420 MPa) = D16

Tulangan sengkang (f_y 280 MPa) = $\emptyset 8$

Lebar efektif balok penggantung *lift* :

$$d = h - s - \left(\frac{1}{2} D_{\text{tul. utama}}\right) - \emptyset_{\text{tul. segkang}} = 400 - 40 - \left(\frac{1}{2} \cdot 16\right) - 8 = 344 \text{ mm}$$

$$d' = s - \left(\frac{1}{2} D_{\text{tul. utama}}\right) + \emptyset_{\text{tul. segkang}} = 40 + \left(\frac{1}{2} \cdot 16\right) + 8 = 56 \text{ mm}$$

Syarat Batas

Syarat batas penulangan pada balok anak lantai rencana harus sesuai dengan SNI 2847:2019 Tabel 22.2.2.4.3 hal 478 karena $f'c = 35$ MPa, maka menggunakan $28 < f'c < 55$.

Sehingga dapat diperhitungkan sebagai berikut:

$$\beta = 0,85 - \frac{0,05 (f'c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05 (35 - 28)}{7} = 0,8$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'c \cdot B}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f} \right) = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,8}{420} \left(\frac{600}{600 + 420} \right) = 0,0333$$

$$\rho_{\text{max}} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0333 = 0,0249$$

$$\rho_{\text{min}} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{420} = 0,0033$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'c} = \frac{420}{0,85 \times 35} = 14,11$$

Daerah Tumpuan

$$M_u = 10357,06 \text{ Kg.m} = 10357060 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\emptyset} = \frac{10357060}{0,8} = 12946325 \text{ Nmm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{12946325}{250 \cdot 344^2} = 0,44 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 0,44}{420}} \right) = 0,0011$$

$$\rho_{perlu} = 0,0011 < \rho_{min} = 0,0033 < \rho_{max} = 0,024 \text{ maka dipakai } (\rho_{min} = 0,0033)$$

Tulangan tumpuan atas :

$$A_s \text{ Perlu} = \rho_{perlu} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 250 \cdot 344 = 283,8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai 2D16 } (A_s = 402 \text{ mm}^2)$$

Tulangan tumpuan bawah :

$$A_s' = \delta \cdot A_s \text{ pakai} = 0,5 \cdot 804 = 402 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai 2D16 } (A_s = 402 \text{ mm}^2)$$

Kontrol tulangan :

$$a = \frac{A_{spakai} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{402 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 250} = 22,70$$

$$M_n = A_s \text{ pakai} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 402 \cdot 420 \left(344 - \frac{22,70}{2} \right) = 56164626 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 56164626 \text{ Nmm} > 106364500$$

Maka dipakai tulangan lentur balok *lift* (BA 25/40) untuk daerah tumpuan adalah :

Tulangan lentur tarik 1 lapis = 4D16

Tulangan lentur tekan 1 lapis = 2D16

Daerah Lapangan

$$M_u = 7183,42 \text{ Kg.m} = 71834200 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{71834200}{0,8} = 89792750 \text{ Nmm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{89792750}{250 \cdot 344^2} = 2,96 \text{ N/mm}^3$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 2,96}{420}} \right) = 0,0074$$

$$\rho_{min} = 0,0033 < \rho_{perlu} = 0,0074 < \rho_{max} = 0,024 \text{ maka dipakai } (\rho_{perlu} = 0,0074)$$

Tulangan tumpuan bawah :

$$A_s \text{ Perlu} = \rho_{perlu} \cdot b \cdot d = 0,0074 \cdot 250 \cdot 344 = 636,4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai 4D16 } (A_s = 804 \text{ mm}^2)$$

Tulangan tumpuan atas :

$$A_s' = \delta \cdot A_s \text{ pakai} = 0,5 \cdot 804 = 402 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai 2D16 } (A_s = 402 \text{ mm}^2)$$

Kontrol tulangan :

$$a = \frac{A_{spakai} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{804 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 250} = 45,402$$

$$M_n = A_s \text{ pakai} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) = 804 \cdot 420 \left(344 - \frac{45,402}{2}\right) = 108496246,3 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 108496246,3 \text{ Nmm} > 12946325$$

Maka dipakai tulangan lentur balok *lift* (BA 25/40) untuk daerah tumpuan adalah :

Tulangan lentur tarik 1 lapis = 2D16

Tulangan lentur tekan 1 lapis = 2D16

- **Penulangan Geser Balok Penggantung *Lift***

Daerah Tumpuan

$$\text{Beban geser terfaktor } (V_u) = 13102,75 \text{ Kg} = 13102,75 \text{ N}$$

$$\text{Kekuatan geser beton } (V_c) = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{35} \cdot 250 \cdot 344 = 84797,14 \text{ N}$$

Kategori desain :

$$\emptyset V_c = 0,75 \times 84797,14 = 63597,85 \text{ N}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \emptyset V_c = \frac{1}{2} \times 63597,85 = 31798,92 \text{ N}$$

$$V_s = \frac{1}{3} \cdot b_w \cdot d = \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 344 = 28666,66 \text{ N}$$

$$\emptyset V_s = 0,75 \times 28666,66 = 21499,99 \text{ N}$$

$$\emptyset V_c + \emptyset V_s = 63597,85 + 21499,99 = 85097,84 \text{ N}$$

$$\text{Min} \cdot \emptyset V_s = 0,6 \times 21499,99 = 12899,99 \text{ N}$$

$$\emptyset V_c + \text{min} \emptyset V_s = 63597,85 + 12899,99 = 76497,84 \text{ N}$$

$$\emptyset \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d = 0,6 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 344 = 101756,57 \text{ N}$$

$$\emptyset V_c + \emptyset \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d = 63597,85 + 101756,57 = 165354,42 \text{ N}$$

$$\emptyset \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d = 0,6 \times \frac{2}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 344 = 203513,14 \text{ N}$$

$$\emptyset V_c + \emptyset \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d = 63597,85 + 203513,14 = 267110,99 \text{ N}$$

Kategori desain :

Untuk $V_u = 128340,60 \text{ N}$, maka termasuk dalam kategori desain ke – 3, dimana $\emptyset V_c$

$$< V_u < \emptyset V_c + \emptyset V_c + \emptyset \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b_w \cdot d = 63597,85 \text{ N} < 128340,60 \text{ N} < 165354,42$$

N

$$\text{Max. } S \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{344}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq 171 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm}$$

Direncanakan sengkang dengan jarak $S=100 \text{ mm}$

Maka luas penampang adalah :

$$A_{v_{\min}} = \frac{bw S}{3 f_y} = \frac{250 \times 100}{3 \times 280} = 29,76 \text{ mm}^2$$

Dipakai sengkang 2 kaki Ø8 mm :

$$A_v = n \frac{1}{4} \pi d^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48 \text{ mm}^2 > 29,76 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gaya perlawanan sengkang :

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v f_y \cdot d}{s} = \frac{0,75 \cdot 100,48 \cdot 280 \cdot 344}{100} = 72586,75 \text{ N} > \text{Min. } \phi V_s 12899,99 \text{ (OK)}$$

Daerah Lapangan

Beban geser terfaktor (V_u) = 12834,06 Kg = 128340600 N

$$\text{Kekuatan geser beton } (V_c) = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{35} \cdot 250 \cdot 344 = 84797,14 \text{ N}$$

Kategori desain :

ϕV_c	$= 0,75 \times 84797,14$	$= 63597,85 \text{ N}$
$\frac{1}{2} \cdot \phi V_c$	$= \frac{1}{2} \times 63597,85$	$= 31798,92 \text{ N}$
$V_s = \frac{1}{3} \cdot bw \cdot d$	$= \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 344$	$= 28666,66 \text{ N}$
ϕV_s	$= 0,75 \times 28666,66$	$= 21499,99 \text{ N}$
$\phi V_c + \phi V_s$	$= 63597,85 + 21499,99$	$= 85097,84 \text{ N}$
Min. ϕV_s	$= 0,6 \times 21499,99$	$= 12899,99 \text{ N}$
$\phi V_c + \text{min } \phi V_s$	$= 63597,85 + 12899,99$	$= 76497,84 \text{ N}$
$\phi \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot bw \cdot d$	$= 0,6 \times \frac{1}{3} \times \sqrt{35} \times 250 \times 344$	$= 101756,57 \text{ N}$
$\phi V_c + \phi \cdot \frac{1}{3} \sqrt{f'c'} \cdot bw \cdot d$	$= 63597,85 + 101756,57$	$= 165354,42 \text{ N}$
$\phi \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot bw \cdot d$	$= 0,6 \times \frac{2}{3} \sqrt{35} \times 250 \times 344$	$= 203513,14 \text{ N}$
$\phi V_c + \phi \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'c'} \cdot bw \cdot d$	$= 63597,85 + 203513,14$	$= 267110,99 \text{ N}$

Kategori desain :

Untuk $V_u = 128340600 \text{ N}$, maka termasuk dalam kategori desain ke – 3, dimana $\phi V_c < V_u < \phi V_c + \phi V_c + \phi \cdot \frac{1}{3} \sqrt{f'c'} \cdot bw \cdot d = 63597,85 \text{ N} < 128340,60 \text{ N} < 165354,42 \text{ N}$

$$\text{Max. } S \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq \frac{344}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

$$\text{Max. } S \leq 171 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm}$$

Direncanakan sengkang dengan jarak $S=100 \text{ mm}$

Maka luas penampang adalah :

$$A_{v_{\min}} = \frac{bw S}{3 f_y} = \frac{250 \times 100}{3 \times 280} = 29,76 \text{ mm}^2$$

Dipakai sengkang 2 kaki Ø8 mm :

$$A_v = n \frac{1}{4} \pi d^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48 \text{ mm}^2 > 29,76 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gaya perlawanan sengkang :

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v f_y \cdot d}{s} = \frac{0,75 \cdot 100,48 \cdot 280 \cdot 344}{100} = 72586,75 \text{ N} > \text{Min. } \phi V_s 12899,99 \text{ (OK)}$$

Tabel 6. 6 Rekapitulasi Balok Penggantung Lift

Tipe	Dimensi	Tulangan	Tumpuan	Lapangan
	(mm)			
Balok Penggantung Lift	25/40	Atas	2D16	2D16
		Bawah	2D16	2D16
		sengkang	Ø8-100	Ø8-100

BAB VII

STRUKTUR PRIMER

7.1. Struktur Primer

Dalam perencanaan gedung apartemen ini, struktur primer yang terdiri atas rangkaian balok dan kolom memegang peranan krusial sebagai penopang utama beban seismik. Mengingat kekakuan struktur sangat memengaruhi respons bangunan saat terjadi guncangan, desain gedung ini mengimplementasikan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) untuk memperkuat ketahanan gempa dan mencegah risiko kegagalan struktur. Proses analisis dilakukan melalui simulasi komputer dengan mengintegrasikan standar teknis SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, serta SNI 1727:2020 sebagai landasan perhitungan beban dan kriteria keamanan.

7.2. Data Perencanaan Struktur Primer

Perencanaan gedung apartemen Az zahr dengan struktur beton bertulang tahan gempa yang sesuai dengan SNI 2847:2019 dengan data perencanaan sebagai berikut:

Mutu beton (f_c')	= 35 MPa
Mutu baja tulangan (f_y)	= 420 MPa
Mutu baja tulangan geser (f_y/s)	= 280 MPa
Modulus elastisitas beton (E_c)	= $4700 \sqrt{f_c'} = 4700 \sqrt{35} = 27805,57$ MPa
Modulus elastisitas baja (E_s)	= 200000 MPa
Jumlah lantai	= 10 lantai
Panjang bangunan	= 45 m
Lebar bangunan	= 45 m
Tinggi tiap lantai	= 4 m
Tinggi bangunan	= 40 m
Luas Atap	= $((10,30 \times 45,30) + (5 \times 35,30) \times 2)$ = 1286,18 m ²
Penutup atap	= Dak Beton
Dimensi balok induk	= 30/60 cm

Dimensi balok anak	= 25/40 cm
Dimensi kolom	= 50 x 50 cm
Klasifikasi situs tanah	= Tanah Lunak
Nilai S_{DS}	= 0,75
Nilai S_{D1}	= 0,79
Nilai R	= 8 (SNI 1726:2019 Tabel 12 Pasal 7.2)
Nilai C_d	= 5,5 (SNI 1726:2019 Tabel 12 Pasal 7.2)
S_s	= 1,1245 g
S_1	= 0,5737 g

(TAMBAHKAN GAMBAR PEMODELAN)

7.3. Pembebanan

Dalam menjamin keamanan sebuah bangunan, perhitungan pembebanan menjadi landasan dasar untuk memahami gaya-gaya yang bekerja pada sistem struktur. Fokus utama dalam analisis ini mencakup dua elemen beban penting, yaitu beban gravitasi dan beban gempa.

7.3.1. Perhitungan Beban Gravitasi

• Perhitungan Berat Gedung Pada Atap

Beban Mati (Dead Load)

Pelat	= (1286,18 x 0,12) x 2400	= 370419,84 Kg
Balok Induk (BI) X	= ((0,30 x 0,60 x 138) x 2) x 2400	= 119232 Kg
Balok Induk (BI) Y	= ((0,30 x 0,60 x 125,9) x 2) x 2400	= 108777,6 Kg
Balok Anak (BA) X	= ((0,25 x 0,40 x 127,7) x 2) x 2400	= 61296 Kg
Balok Anak (BA) Y	= ((0,25 x 0,40 x 125,9) x 2) x 2400	= 60432 Kg
Balok Lift	= ((0,25 x 0,40 x 5) x 1) x 2400	= 1200 Kg
Ducting AC + Instalasi	= 1286,18 x 50	= 64309 Kg
Plafond + Penggantung	= 1286,18 x 18	= 23151,24 Kg
Finishing (1cm)	= (1286,18) x (1 x 21)	= 27009,78 Kg
Aspal (1 cm)	= (1286,18) x (1x14)	= 18006,52 Kg
Spesi (2 cm)	= (1286,18) x (2x21)	= 54019,56 Kg +
Beban mati atap		= 907853,54 Kg

Beban Hidup (Live Load)

Beban hidup atap	= 1286,18 x 96 = 123473,28 Kg
------------------	-------------------------------

Berdasarkan PPPIUG Pasal 3.5 Tabel 3.3, diketahui nilai beban hidup dapat dikalikan dengan factor reduksi untuk peninjauan gempa sebesar 0,30 untuk gedung apartemen.

Maka nilai beban hidup adalah sebagai berikut:

$$\text{Beban hidup atap} = 0,30 \times 123473,28 = 37041 \text{ Kg}$$

Beban Hujan

Dengan mengasumsikan kedalaman air pada atap (ds) ialah 15 mm, dan tambahan untuk kedalaman air pada atap diatas lubang drainase (dh) ialah 10 mm, maka untuk beban air hujan (qR) diperoleh :

$$\begin{aligned} R &= 0,0098 \times (ds + dh) \\ &= 0,0098 \times (15 + 10) \\ &= 0,245 \text{ kN/m}^2 \\ &= 24,50 \text{ Kg/m}^2 \end{aligned}$$

Maka, beban air hujan pada atap yaitu :

$$\begin{aligned} L_r &= 1286,18 \times 24,50 \\ &= 31511,41 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Total Berat Lantai Atap

$$\begin{aligned} Q_u \text{ atap} &= 1,2 (907853,54) + 1,6 (37041) + 0,5 (31511,41) \\ &= 1164445,55 \text{ Kg} \\ &= 11644455,5 \text{ N} \end{aligned}$$

• Perhitungan Berat Gedung Pada Masing – Masing Lantai

Beban Mati (Dead Load) Lantai 1

Pelat	$= (45 \times 45 \times 0,12) \times 2400$	$= 583200$	Kg
Balok Induk (BI)	$= ((10 \times 45) + (10 \times 45)) \times 0,3 \times 0,6 \times 2400$	$= 388800$	Kg
Balok Anak (BA)	$= ((9 \times 45) + (9 \times 45)) \times 0,25 \times 0,4 \times 2400$	$= 194400$	Kg
Kolom	$= ((0,50 \times 0,50 \times 4) \times 100) \times 2400$	$= 240000$	Kg
Dinding	$= ((280 \times 3,4) \times 250)$	$= 238000$	Kg
Ducting AC + Instalasi	$= 45 \times 45 \times 50$	$= 101250$	Kg
Plafond + Penggantung	$= 45 \times 45 \times 18$	$= 36450$	Kg
Keramik	$= (45 \times 45) \times (1 \times 24)$	$= 48600$	Kg
Spesi (2 cm)	$= (45 \times 45) \times (2 \times 21)$	$= 85050$	Kg
Beban mati lantai		$= 1915750$	Kg

Beban Mati (Dead Load) Lantai 2

Pelat	$= (45 \times 45 \times 0,12) \times 2400$	$= 583200$	Kg
-------	--	------------	----

Balok Induk (BI)	$= ((10 \times 45) + (10 \times 45)) \times 0,3 \times 0,6 \times 2400$	$= 388800$	Kg
Balok Anak (BA)	$= ((9 \times 45) + (9 \times 45)) \times 0,25 \times 0,4 \times 2400$	$= 194400$	Kg
Kolom	$= ((0,50 \times 0,50 \times 4) \times 100) \times 2400$	$= 240000$	Kg
Dinding	$= ((400 \times 3,4) \times 250)$	$= 340000$	Kg
Ducting AC + Instalasi	$= 45 \times 45 \times 50$	$= 101250$	Kg
Plafond + Penggantung	$= 45 \times 45 \times 18$	$= 36450$	Kg
Keramik	$= (45 \times 45) \times (1 \times 24)$	$= 48600$	Kg
Spesi (2 cm)	$= (45 \times 45) \times (2 \times 21)$	$= 85050$	Kg +
Beban mati lantai		$= 2017750$	Kg

Beban Mati (Dead Load) Lantai 3-10

Pelat	$= (1381,66 \times 0,12) \times 2400$	$= 397918$	Kg
Balok Induk (BI)	$= 400 \times 0,3 \times 0,6 \times 2400$	$= 172800$	Kg
Balok Anak (BA)	$= 360 \times 0,25 \times 0,4 \times 2400$	$= 86400$	Kg
Kolom	$= ((0,50 \times 0,50 \times 4) \times 60) \times 2400$	$= 144000$	Kg
Dinding	$= ((600 \times 3,4) \times 250)$	$= 510000$	Kg
Ducting AC + Instalasi	$= 1381,66 \times 50$	$= 69083$	Kg
Plafond + Penggantung	$= 1381,66 \times 18$	$= 24870$	Kg
Keramik	$= 1381,66 \times (1 \times 24)$	$= 33160$	Kg
Spesi (2 cm)	$= 1381,66 \times (2 \times 21)$	$= 58030$	Kg +
Beban mati lantai		$= 1496261$	Kg

Beban Hidup (Live Load)

Penentuan beban hidup pada struktur gedung apartemen ini didasarkan pada SNI 1727:2020 tentang "Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain". Besaran beban hidup ditentukan berdasarkan fungsi dari masing-masing lantai sebagai berikut:

1. Lantai 1 dan Lantai 2 (Area Publik/Lobi)

Berdasarkan SNI 1727:2020 Tabel 4.3-1, lantai pertama dan area koridor/lobi pada lantai di atasnya yang berfungsi sebagai area publik diklasifikasikan dengan beban hidup sebesar $4,79 \text{ kN/m}^2$ atau setara dengan 479 kg/m^2 .

- Luas Lantai: $45 \text{ m} \times 45 \text{ m} = 2025 \text{ m}^2$
- Beban Hidup: $2025 \text{ m}^2 \times 479 \text{ kg/m}^2 = 969975 \text{ Kg}$

2. Lantai 3 sampai Lantai 10 (Unit Hunian/Apartemen)

Berdasarkan SNI 1727:2020, area yang berfungsi sebagai unit hunian atau kamar apartemen memiliki beban hidup sebesar $1,92 \text{ kN/m}^2$ atau setara dengan 192 kg/m^2 .

- Luas Lantai: $1381,66 \text{ m}^2$
- Beban Hidup: $1381,66 \text{ m}^2 \times 192 \text{ kg} = 265278,72 \text{ Kg}$

Berdasarkan PPPIUG Pasal 3.5 Tabel 3.3, diketahui nilai beban hidup dapat dikalikan dengan factor reduksi untuk peninjauan gempa sebesar 0,30 untuk gedung apartemen.

Maka nilai beban hidup adalah sebagai berikut:

$$\text{Beban hidup Lantai 1-2} = 0,30 \times 969975 = 290992,5 \text{ Kg}$$

$$\text{Beban hidup Lantai 3-10} = 0,30 \times 265278,72 = 79583,62 \text{ Kg}$$

Total Berat Lantai Atap

$$\begin{aligned} \text{Qu atap} &= 1,2 (2017750) + 1,6 (290992,5) \\ &= 2886888 \text{ Kg} \\ &= 28868880 \text{ N} \end{aligned}$$

• **Rekapitulasi Perhitungan Beban Gravitasi**

Beban gravitasi yang bekerja pada struktur bangunan meliputi beban mati dan beban hidup pada tiap lantai. Rekapitulasi berat tiap lantai dari gedung Apartemen Az Zahr dapat dilihat pada Tabel 6.1.

Tabel 7. 1 Berat Tiap Lantai

Lantai Ke -	Beban mati (Kg)	Beban Hidup (Kg)	Total (Kg)
Atap	907853,54	37041,00	944894,54
10	1496261,00	79583,62	1575844,62
9	1496261,00	79583,62	1575844,62
8	1496261,00	79583,62	1575844,62
7	1496261,00	79583,62	1575844,62
6	1496261,00	79583,62	1575844,62
5	1496261,00	79583,62	1575844,62
4	1496261,00	79583,62	1575844,62
3	1496261,00	79583,62	1575844,62
2	2017750,00	290992,5	2308742,50
1	1915750,00	290992,5	2206742,50
Total (W)			18067136,50

7.3.2. Perhitungan Beban Gempa

Analisis beban seismik pada perencanaan ini sepenuhnya merujuk pada pedoman **SNI 1726:2019** mengenai **Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung**, dengan mengimplementasikan metode **Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)**.

- **Periode Fundamental Struktur**

Nilai periode fundamental (T) untuk arah yang ditinjau idealnya ditentukan berdasarkan evaluasi properti struktural serta karakteristik deformasi dari elemen penahan beban melalui pemodelan struktur yang valid. Namun, sebagai langkah evaluasi awal, **SNI 1726:2019 Pasal 7.8.2.1** mengizinkan penggunaan **periode fundamental pendekatan (T)**

Khusus untuk sistem **struktur SRPMK**, besaran nilai pendekatan tersebut diperoleh melalui parameter berikut:

$$C_t = 0,0466$$

$$x = 0,9$$

$$C_u = 1,4$$

$$\begin{aligned} T_a &= C_t \cdot h_n^x \\ &= 0,0466 \cdot 40^{0,9} \\ &= 1,29 \text{ detik} \end{aligned}$$

Maka batas periode fundanmental (T) ialah :

$$\begin{aligned} T &= C_u \cdot T_a \\ &= 1,4 \cdot 1,29 \\ &= 1,80 \text{ detik} \end{aligned}$$

Kota Padang memiliki $S_{D1} = 0,79$, menurut **SNI 1726:2019 Tabel 17**, maka Kota Padang memiliki koefisien $C_u = 1,4$

$$C_u > T_a = 1,4 > 1,29 \text{ (Ok)}$$

Dimana :

h_n = ketinggian struktur (m) diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktur.

C_t = ditentukan dari **SNI 1726:2019 Tabel 18**

x = ditentukan dari **SNI 1726:2019 Tabel 18**

C_u = ditentukan dari **SNI 1726:2019 Tabel 17**

- **Koefisien Respon Seismik**

Sesuai dengan regulasi **SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1**, distribusi gaya lateral akibat gempa dilakukan dengan membagi total gaya geser dasar seismik ke seluruh tingkat

sepanjang tinggi struktur gedung. Prosedur penentuan besaran gaya geser dasar tersebut mensyaratkan perhitungan koefisien respons seismik (C_s) sebagai parameter utama, yang ditentukan melalui formulasi berikut:

$$C_s = \frac{s_{ds}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{0,75}{\left(\frac{8}{1,0}\right)} = 0,094$$

Namun tidak boleh lebih besar dari :

$$C_{smax} = \frac{s_{d1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{0,79}{1,80\left(\frac{8}{1,0}\right)} = 0,0521$$

Dan tidak boleh kurang dari $C_{smin} = \frac{0,5 \cdot S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{0,5 \cdot 0,5737}{\left(\frac{8}{1,0}\right)} = 0,0359$

Dimana nilai C_s terkecil yaitu $C_s = 0,0359$

Dimana :

C_s = Koefisien dasar *seismik*, sesuai peraturan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1.1.

S_{ds} = Parameter percepatan respons spektrum desain dalam rentang periode pendek didapatkan dari situs gempa Indonesia seperti **Gambar 6.1**.

R = Faktor modifikasi respon (SNI 1726:2019 Tabel 12)

I_e = Faktor keutamaan gaya gempa (SNI 1726:2019 Tabel 4)

Untuk penentuan jenis tanah dapat dilakukan berdasarkan data dan perhitungan pada **Tabel 6.2**. dimana penentuan jenis tanah digunakan untuk menentukan nilai S_{ds} dan S_{d1} .

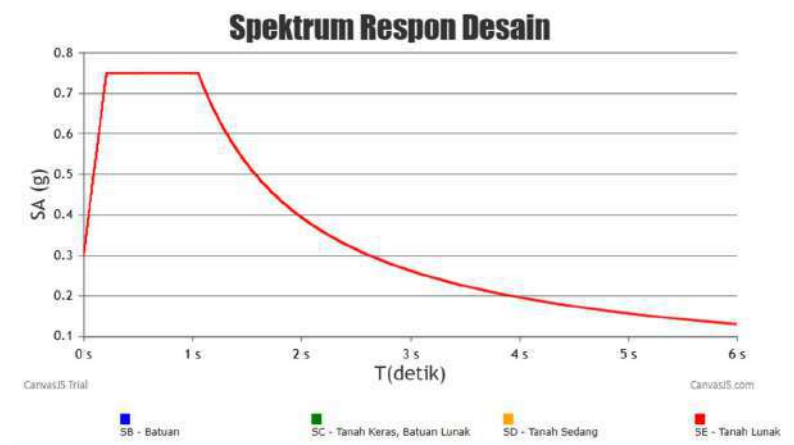
Tabel 7. 2 Perhitungan Jenis Tanah Kota Padang

No	Kedalaman (m)	Tebal (m)	Nilai SPT	$N' = T/N$
1	0,00 - 2,00	2	2	1,00
2	2,00 - 4,00	2	3	0,67
3	4,00 - 6,00	2	4	0,50
4	6,00 - 8,00	2	4	0,50
5	8,00 - 10,00	2	4	0,50
6	10,00 - 12,00	2	13	0,15
7	12,00 - 14,00	2	25	0,08
8	14,00 - 16,00	2	17	0,12
9	16,00 - 18,00	2	27	0,07
10	18,00 - 20,00	2	21	0,10
11	20,00 - 22,00	2	21	0,10
12	22,00 - 24,00	2	18	0,11

13	24,00 - 26,00	2	15	0,13
14	26,00 - 28,00	2	8	0,25
15	28,00 - 30,00	2	9	0,23
Total (Σ)		30		4,50
Total (Σ)			6,67	
Mengacu pada peraturaaan SNI 1726:2019 Tabel 5 Klasifikasi Situs				
$\Sigma N = \Sigma T / \Sigma N' = 6,67 < 15$ (Tanah Lunak)				

Catatan : T = nilai fundamental struktur = 1,80 dan N = Nilai

Hasil perhitungan pada Tabel 7.2 menunjukkan bahwa kategori tanah di lokasi tinjauan (Padang) merupakan klasifikasi tanah lunak. Karakteristik pergerakan tanah yang dihasilkan dari parameter tersebut dapat dilihat melalui grafik respons spektrum yang tersaji pada Gambar 6.1.



Gambar 7. 1 Respon Spektrum Kota Padang

(sumber : <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>)

- **Beban Geser Dasar *Seismik***

Penentuan total beban lateral pada dasar gedung (V) merujuk pada regulasi SNI 1726:2019 Pasal 7.8.1. Nilai tersebut diperoleh dari nilai koefisien respons seismik (C_s) yang dikalikan dengan berat total gedung (W), dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = C_s \cdot W$$

$$= 0,0359. 18067136,50$$

$$= 648610.20 \text{ Kg}$$

• **Beban Gempa Statik Ekuivalen**

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.3. dimana k adalah eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai $= 1$. Apabila $T < 0,5$ detik, nilai $k = 1$ untuk $T > 2,5$ detik, nilai $k = 2$ atau dengan interpolasi linier antara 1 dan 2. Untuk nilai k yang menggunakan interpolasi linier dengan nilai $T = 1,80$.

$K = 2$ karena $0,5 < T < 2,5$ detik $= 0,5 < 1,80 < 2,5$ detik, maka digunakan $k = 2$ (SNI 2847:2019, Pasal 7.8.3)

Nilai beban gempa statik ekuivalen (F_i) didapat dengan menggunakan perumusan sebagai berikut :

Nilai beban gempa statik ekuivalen (F_i) didapat dengan menggunakan perumusan sebagai berikut :

$$F_i = \frac{W_i \cdot h_i^k}{\sum W_i \cdot h_i^k} \cdot V$$

Untuk atap diperoleh :

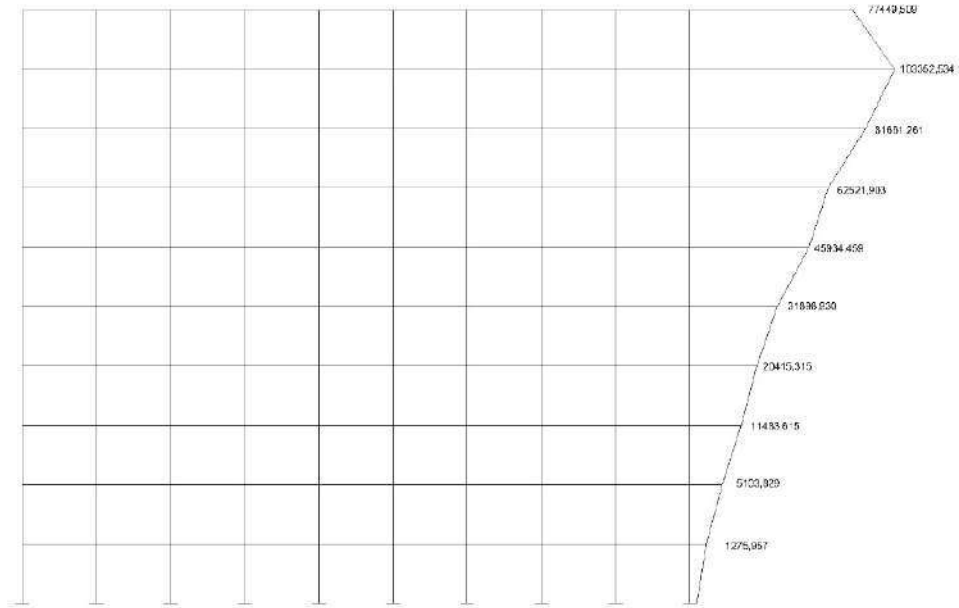
$$F_i = \frac{W_i \cdot h_i^k}{\sum W_i \cdot h_i^k} \cdot V$$

$$F_i = \frac{8204727,5 \cdot 40^2}{13127564,00} \cdot 648610.20$$

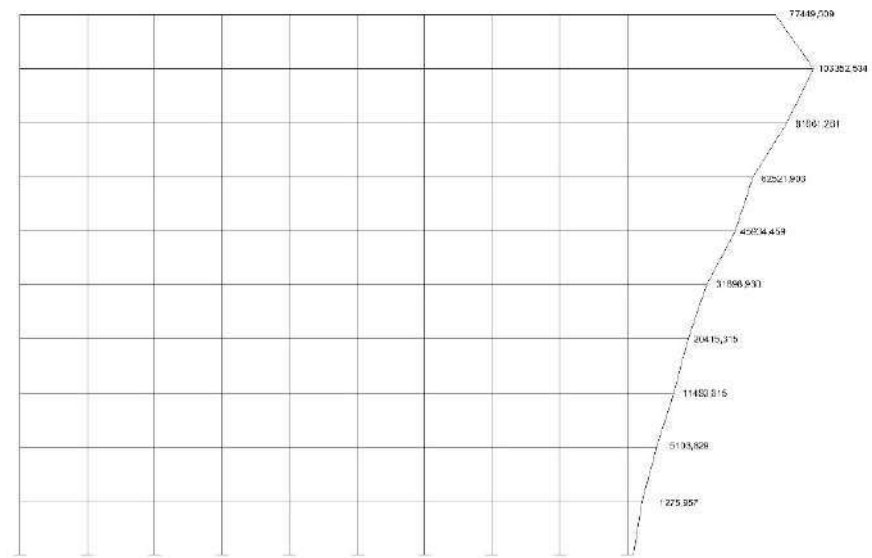
Maka dengan perhitungan yang sama, untuk besarnya nilai statik ekuivalen (F_i) pada tiap lantai dapat dilihat pada table berikut:

Gambar 7. 2 Perhitungan Beban Gempa Statik Ekuivalen (F_i) Tiap Lantai

Lantai	Tinggi	Berat Tiap Lantai	Faktor	Momen	Gaya Dasar Seisimik	Gaya Lateral
	(hi)	(Wi)			(V)	
	(m)	(Kg)		(Wi x hi^k)	(kg)	(fix = Fiy)
Atap	40	944894.54	2	1511831264	648610.2	112589.6335
10	36	1575844.62	2	2042294628	648610.2	152094.4891
9	32	1575844.62	2	1613664891	648610.2	120173.4235
8	28	1575844.62	2	1235462182	648610.2	92007.77734
7	24	1575844.62	2	907686501.1	648610.2	67597.5507
6	20	1575844.62	2	630337848	648610.2	46942.74354
5	16	1575844.62	2	403416222.7	648610.2	30043.35587
4	12	1575844.62	2	226921625.3	648610.2	16899.38768
3	8	1575844.62	2	100854055.7	648610.2	7510.838967
2	4	2308742.5	2	36939880	648610.2	2750.999831
1	0	2206742.5	2	0	648610.2	0
Total $\sum$		18067136.5		8709409097		648610.2



(a)



(b)

Gambar 7. 3(a)Gaya Gempa Tiap Lantai Arah X ;(b)Gaya Gemp Tiap Lantai Arah Y

- **Kombinasi Pembebanan**

Pada perhitungan analisa struktur Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus ini akan dihitung menggunakan program bantu komputer (*Robot Structural Analysis Professional*), dengan jumlah 18 macam kombinasi yang mengacu pada peraturan SNI 1726:2019.

Gambar 7. 4 Kombinasi Pembebanan

Type	Kombinasi Beban
Combo 1	1,4D
Combo 2	1,2D + 1,6L
Combo 3	1,2D + L +GX + 0,3Y
Combo 4	1,2 D + 1,0 L + 1,0 GX - 0,3 GY
Combo 5	1,2 D + 1,0 L - 1,0 GX + 0,3 GY
Combo 6	1,2 D + 1,0 L - 1,0 GX - 0,3 GY
Combo 7	0,9 D + 1,0 GX + 0,3 GY
Combo 8	0,9 D + 1,0 GX - 0,3 GY
Combo 9	0,9 D - 1,0 GX + 0,3 GY
Combo 10	0,9 D - 1,0 GX - 0,3 GY
Combo 11	1,2 D + 1,0 L + 0,3 GX + 1,0 GY
Combo 12	1,2 D + 1,0 L + 0,3 GX - 1,0 GY
Combo 13	1,2 D + 1,0 L - 0,3 GX + 1,0 GY
Combo 14	1,2 D + 1,0 L - 0,3 GX - 1,0 GY
Combo 15	0,9 D + 0,3 GX + 1,0 GY
Combo 16	0,9 D + 0,3 GX - 1,0 GY
Combo 17	0,9 D - 0,3 GX + 1,0 GY
Combo 18	0,9 D - 0,3 GX - 1,0 GY

(Sumber : SNI 1726:2019 Pasal 4.2.2 dan Pasal 7.5.2.2)

- **Batas Simpangan Antar Lantai**

Penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi sebagai pusat massa di tingkat teratas dan terbawah gedung. Simpangan antar lantai tingkat desain tidak boleh melebihi simpangan antar lantai izin (Δ_a) seperti yang

didapatkan dari **Tabel 2.11** untuk semua tingkat. Gedung Apartemen Az Zahr termasuk kedalam kategori risiko II, maka simpangan antar lantai izin (Δa) ditentukan berdasarkan $0,020hsx$. Simpangan antar lantai dapat dihitung berdasarkan rumus yang terdapat pada SNI 1726-2019 pasal 7.8.6 sebagai berikut: Maka, simpangan antar lantai dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\delta xy = \frac{cd \cdot \delta \cdot e}{Ie}$$

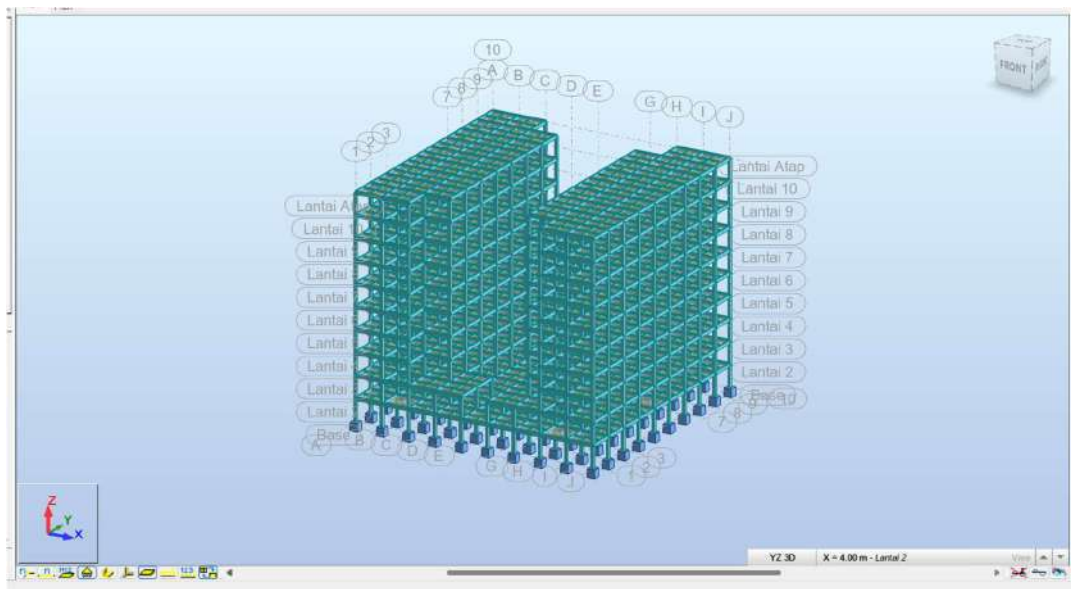
Dimana:

δx = Defleksi pusat massa di tingkat x (mm)

Cd = Faktor amplifikasi defleksi (SNI 1726:2019 Tabel 12) SRPMK dengan nilai = 5,5

δxe = Defleksi pada lokasi yang diisyaratkan

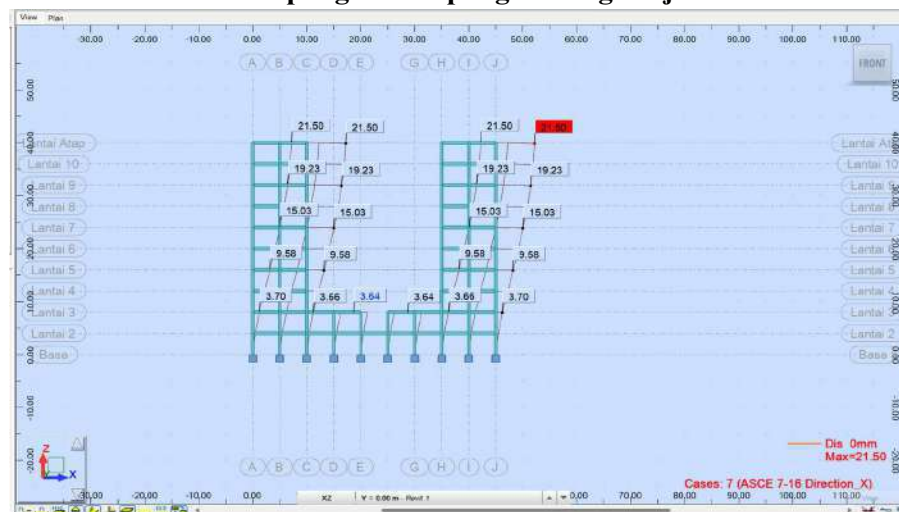
Ie = Faktor kesutamaan gempa (SNI 1726:2019 Tabel 4) dengan nilai = 1,0



Gambar 7. 5 Bentuk 3D Gedung Apartemen Az Zahr



Gambar 7. 6 Simpangan Yang Terjadi di arah X



Gambar 7. 7 Simpangan Yang Terjadi di arah Y

Dari hasil analisa pemodelan struktur 3D pada RSAP, diketahui nilai simpangan antar lantai seperti yang dapat dilihat pada Tabel 6.5.

Nilai simpangan antar lantai izin :

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= 0,20h \text{ (SNI 1726:2019 Tabel 12)} \\ &= 0,20 \times 400 \\ &= 80 \text{ mm}\end{aligned}$$

Gambar 7. 8 simpangan tiap Lantai Pada sistem Rangka Pemikul Momen Khusus

Level	hsx	δx	δy	Δx	Δy	Δa (Ijin)	Keterangan
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4000	4000	1.47	1.46	8.03	1.46	80.0	AMAN
8000	4000	3.78	3.76	20.68	2.3	80.0	AMAN
12000	4000	6.63	6.33	34.82	2.57	80.0	AMAN
16000	4000	9.59	8.88	48.84	2.55	80.0	AMAN
20000	4000	12.43	11.29	62.10	2.4	80.0	AMAN
24000	4000	15.05	13.47	74.09	2.2	80.0	AMAN
28000	4000	17.35	15.36	84.48	1.9	80.0	AMAN
32000	4000	19.26	16.89	92.90	1.5	80.0	AMAN
36000	4000	20.68	17.98	98.89	1.1	80.0	AMAN
40000	4000	21.63	18.55	102.03	0.6	80.0	AMAN

- **Kontrol Periode Getar Waktu**

Perhitungan kontrol periode getar waktu pada gedung Apartemen Az Zahr dapat dilihat pada **Tabel 6.6** untuk sumbu X dan **Tabel 6.7** untuk sumbu Y.

Tabel 7. 3 Tabel *T-Rayleigh* Arah X

Lantai	Berat Tiap Lantai	Gaya Gempa	δx	δx^2	$(W_i \times \delta x^2)$	$F_i \times \delta x$
	(W_i)	(F_i)				
	(Kg)	(Kg)	(mm)	(mm)		
Atap	944894.54	112589.6335	21.63	467.8569	442075430.3	2435313.773
10	1575844.62	152094.4891	20.68	427.6624	673929492.2	3145314.035
9	1575844.62	120173.4235	19.26	370.9476	584555779.8	2314540.137
8	1575844.62	92007.77734	17.4	301.0225	474364687.1	1596334.937
7	1575844.62	67597.5507	15.1	226.5025	356932746	1017343.138
6	1575844.62	46942.74354	12.4	154.5049	243475715.4	583498.3022

5	1575844.62	30043.35587	9.59	91.9681	144927435.6	288115.7828
4	1575844.62	16899.38768	6.63	43.9569	69269244.38	112042.9403
3	1575844.62	7510.838967	3.78	14.2884	22516298.27	28390.9713
2	2308742.5	2750.999831	1.47	2.1609	4988961.668	4043.969752
1	2206742.5	0	0	0	0	0
Total Σ					3017035791	11524937.99

$$T_R = 6,3 \sqrt{\frac{\sum w_i \times \delta_x^2}{g \times \sum F_i \times \delta_x}} = 6,3 \sqrt{\frac{3017035791}{9810 \times 11524937.99}} = 1,03 \text{ detik}$$

$$3,5 T_{rx} = 3,5 \times 1,03 = 2,19$$

$$T_a < 3,5 T_{rx} = 1,29 < 3,61 \text{ (Ok)}$$

Maka dengan itu dapat diitung dengan analisa gaya lateral ekuivalen

Tabel 7. 4 Tabel *T- Rayleigh* Arah Y

Lantai	Berat Tiap Lantai	Gaya Gempa	δy	δx^2	$(W_i \times \delta x^2)$	$F_i \times \delta x$
	(Wi)	(Fi)				
	(Kg)	(Kg)	(mm)	(mm)		
Atap	944894.54	112589.6335	18.55	344.1025	325140573.5	2088537.701
10	1575844.62	152094.4891	17.98	323.2804	509439679.1	2734658.914
9	1575844.62	120173.4235	16.89	285.2721	449544504	2029729.123
8	1575844.62	92007.77734	15.4	235.6225	371304449	1412319.382
7	1575844.62	67597.5507	13.5	181.4409	285922666.1	910539.0079
6	1575844.62	46942.74354	15.4	235.9296	371788390.9	721040.5408
5	1575844.62	30043.35587	11.3	127.4641	200863616.2	339189.4878
4	1575844.62	16899.38768	8.88	78.8544	124262282	150066.5626
3	1575844.62	7510.838967	6.33	40.0689	63142360.49	47543.61066
2	2308742.5	2750.999831	3.76	14.1376	32640077.97	10343.75936
1	2206742.5	0	1.46	2.1316	4703892.313	0
Total Σ					2738752492	10443968.09

$$T_R = 6,3 \sqrt{\frac{\sum w_i \times \delta_x^2}{g \times \sum F_i \times \delta_x}} = 6,3 \sqrt{\frac{2738752492}{9810 \times 10443968.09}} = 1,03 \text{ detik}$$

$$3,5 T_{rx} = 3,5 \times 1,03 = 3,61$$

$$T_a < 3,5 T_{rx} = 1,29 < 3,61$$

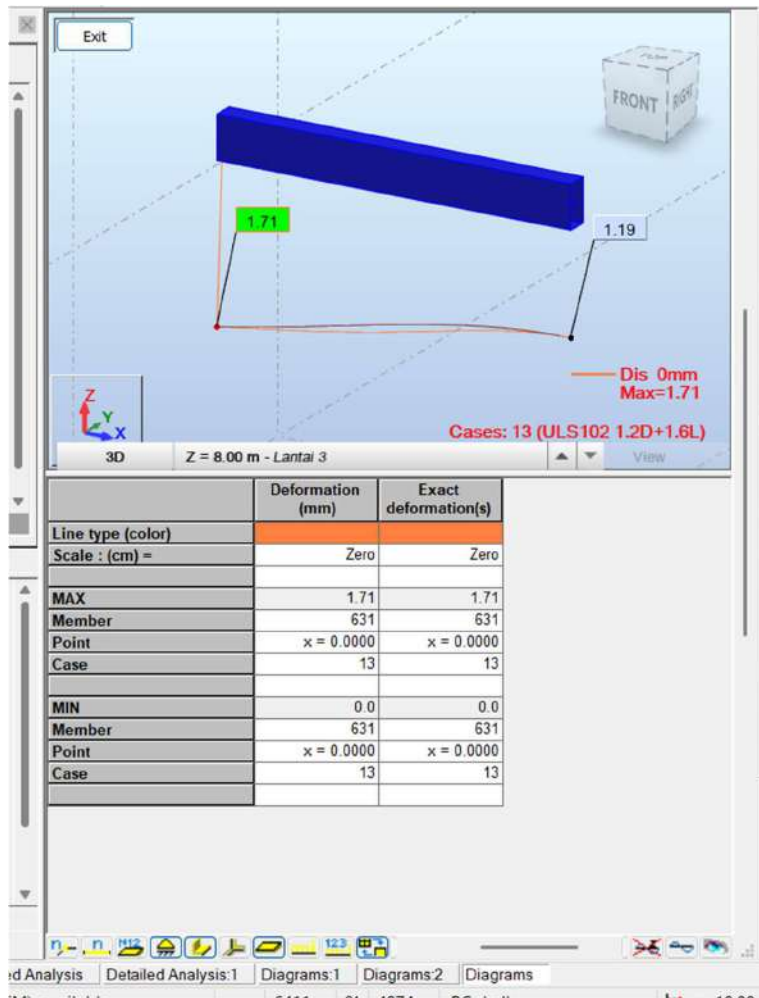
Maka, dengan itu bisa dihitung dengan analisa gaya lateral ekuivalen.

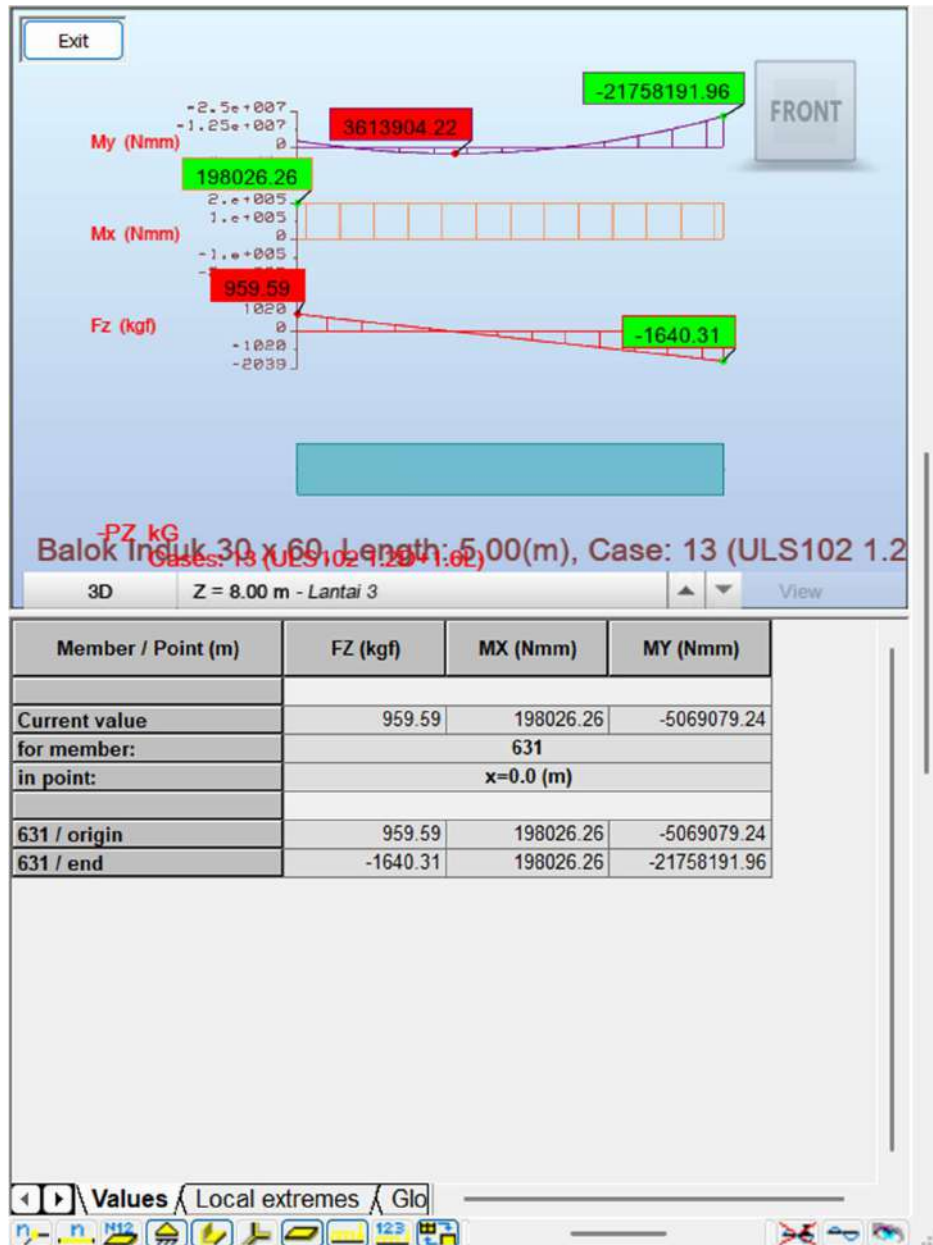
Gambar 7. 9 Analisis Modal

Mode	Frekuensi (Hz)	Periode (detik)	Partisipasi UX (%)	Partisipasi UY (%)	Partisipasi UZ (%)	Kumulatif UX (%)	Kumulatif UY (%)
1	0.47	2.11	74.45	0.00	0.00	74.45	0.00
2	0.50	2.02	0.00	75.72	0.00	74.45	75.72
3	0.54	1.85	0.00	0.00	0.00	74.45	75.72
4	0.51	1.96	0.00	0.00	0.00	74.45	75.72
5	0.57	1.74	0.00	0.00	0.00	74.45	75.72
6	0.58	1.72	0.00	0.57	0.00	74.45	76.29
7	1.42	0.70	12.78	0.00	0.00	87.23	76.29
8	1.51	0.66	0.00	11.74	0.00	87.23	88.03
9	1.52	0.66	0.00	0.00	0.00	87.23	88.03
10	1.54	0.65	0.00	0.00	0.00	87.23	88.03
11	1.73	0.58	0.00	0.00	0.00	87.23	88.03
12	1.76	0.57	0.00	0.09	0.00	87.23	88.03
13	2.39	0.42	6.00	0.00	0.00	93.23	88.03
14	2.50	0.40	0.00	5.63	0.00	93.23	93.75
15	2.55	0.39	0.00	0.00	0.00	93.23	93.75

7.4. Perencanaan Balok Induk

Perencanaan balok induk dilakukan dengan cara memeriksa momen-momen yang terjadi pada setiap balok induk. Adapun momen pada balok induk didapatkan dari *Output* program analisis struktur dan harus diambil satu balok induk.





Diperoleh nilai gaya – gaya dalam untuk balok induk berdasarkan hasil analisa pemodelan struktur 3D dengan program RSAP sebagai berikut :

Momen Tumpuan (M_u) = 21758191.96 Nmm

Momen Lapangan (M_u) = 3613904.22 Nmm

Gaya Geser (V_u) = 9410,36 N

Gaya Torsi (T) = 16085.95 Nmm

Lendutan = 1,71 mm

7.3.3. Penulangan Lentur Balok Induk

- Data Perencanaan**

Bentang balok (L) = 5000 mm

Mutu beton (f'_c) = 35 MPa

Mutu baja (f_y) = Mutu Tulangan Utama = BjTP 420 MPa ($f_y=420$ MPa)
 = Mutu Tulangan Geser = BjTS 280 MPa ($f_y = 280$ MPa)

Dimensi balok = 30/60 cm

Tebal selimut beton (s) = 40 mm

Tulangan utama = D16

Tulangan sengkang = Ø8

Tinggi efektif balok induk :

$$d = h - s - \left(\frac{1}{2} D_{\text{tul. utama}}\right) - \emptyset_{\text{tul. sengkang}} = 600 - 40 - \left(\frac{1}{2} \cdot 16\right) - 8 = 544 \text{ mm}$$

$$d' = s - \left(\frac{1}{2} D_{\text{tul. utama}}\right) + \emptyset_{\text{tul. sengkang}} = 40 + \left(\frac{1}{2} \cdot 16\right) + 8 = 56 \text{ mm}$$

- Syarat Batas Penulangan**

Sesuai SNI 2847:2019 Tabel 22.2.2.4.3, dengan nilai $f'_c = 35$ MPa maka menggunakan rumus $28 < f'_c < 55$ yaitu :

$$\beta = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7} = 0,85 - \frac{0,05 (35 - 28)}{7} = 0,8$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot B}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = \frac{0,85 \cdot 35 \cdot 0,8}{420} \left(\frac{600}{600 + 420} \right) = 0,0333$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0333 = 0,0249$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{420} = 0,0033$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f'_c} = \frac{420}{0,85 \cdot 35} = 14,11$$

- Daerah Tumpuan**

$$M_u = 21758191,96 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{21758191,96}{0,8} = 27197739,95 \text{ Nmm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{27197739,95}{300 \cdot 544^2} = 0,31$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 0,31}{420}} \right) = 0,0105$$

$$\rho_{\min} = 0,0033 < \rho_{\text{perlu}} = 0,0105 < \rho_{\max} = 0,024 \text{ maka dipakai } (\rho_{\text{perlu}} = 0,0105)$$

Tulangan tarik (Bagian atas):

$$A_s \text{ perlu} = \rho_{\text{perlu}} \cdot b \cdot d = 0,0039 \cdot 300 \cdot 544 = 636,48 \text{ mm}^2$$

Dipakai 4D16 ($A_s = 804 \text{ mm}^2$)

Tulangan tarik pakai :

$$A_s \text{ pakai} = n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 16^2 = 804 \text{ mm}^2$$

Jarak antar tulangan tarik:

$$s = \frac{b-2 \cdot ts-2 \cdot D_{geser}-n \cdot D_{lentur}}{n-1} = \frac{300-2 \cdot 40-2 \cdot 8-4 \cdot 16}{4-1} = 46,66 \text{ mm}$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1 spasi bersih tulangan yang sejajar pada satu lapisan horizontal tidak boleh kurang dari :

$$S > 25 \geq D_{lentur}$$

$$46,66 > 25 \geq 16 \quad (\text{Ok})$$

Tulangan tekan (Bagian bawah):

$$A_s' = \delta \cdot A_{s \text{ pakai}} = 0,5 \times 804 = 402 \text{ mm}^2$$

Dipakai 3D16 ($A_s = 603$)

Jarak antar tulangan tekan:

$$s = \frac{b-2 \cdot ts-2 \cdot D_{geser} \cdot D_{lentur}}{n-1} = \frac{300-2 \cdot 40-2 \cdot 8-3 \cdot 16}{3-1} = 78 \text{ mm}$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1 spasi bersih tulangan yang sejajar pada satu lapisan horizontal tidak boleh kurang dari :

$$S > 25 \geq D_{lentur}$$

$$78 > 25 \geq 16 \quad (\text{Ok})$$

Maka tulangan disusun satu lapis

Kontrol tulangan tumpuan:

$$a = \frac{A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{804 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 300} = 37,83$$

$$M_n = A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 804 \cdot 420 \left(544 - \frac{37,83}{2} \right) = 177310702,8 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 177310702,8 \text{ Nmm} > M_{n \text{ awal}} = 27197739,95 \text{ Nmm} \quad (\text{Ok})$$

- **Daerah Lapangan**

$$M_u = 3613904,22 \text{ Nmm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{3613904,22}{0,8} = 4517380,28 \text{ Nmm}$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{4517380,28}{300 \cdot 544^2} = 0,051$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R}{f_y}} \right) = \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 14,11 \cdot 0,051}{420}} \right) = 0,0017$$

$$\rho_{perlu} = 0,0017 < \rho_{min} = 0,0033 < \rho_{max} = 0,024 \text{ maka dipakai } (\rho_{min} = 0,0033)$$

Tulangan tarik pakai (Bagian bawah):

$$A_s \text{ perlu} = \rho_{\text{perlu}} \cdot b \cdot d = 0,0033 \cdot 300 \cdot 544 = 538 \text{ mm}^2$$

Dipakai 4D16 ($A_s = 804 \text{ mm}^2$)

Tulangan tarik pakai :

$$A_s \text{ pakai} = n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 16^2 = 804 \text{ mm}^2$$

Jarak antar tulangan tarik:

$$s = \frac{b-2 \cdot ts-2 \cdot D_{\text{geser}}-n \cdot D_{\text{lentur}}}{n-1} = \frac{300-2 \cdot 40-2 \cdot 8-4 \cdot 16}{4-1} = 46,66 \text{ mm}$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1 spasi bersih tulangan yang sejajar pada satu lapisan horizontal tidak boleh kurang dari :

$$S > 25 \geq D_{\text{lentur}}$$

$$46,66 > 25 \geq 16 \quad (\text{Ok})$$

Tulangan tekan (Bagian atas):

$$A_s' = \delta \cdot A_{s \text{ pakai}} = 0,5 \times 804 = 402 \text{ mm}^2$$

Dipakai 3D16 ($A_s = 603$)

Jarak antar tulangan tekan:

$$s = \frac{b-2 \cdot ts-2 \cdot D_{\text{geser}}-n \cdot D_{\text{lentur}}}{n-1} = \frac{300-2 \cdot 40-2 \cdot 8-3 \cdot 16}{3-1} = 78 \text{ mm}$$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1 spasi bersih tulangan yang sejajar pada satu lapisan horizontal tidak boleh kurang dari :

$$S > 25 \geq D_{\text{lentur}}$$

$$78 > 25 \geq 16 \quad (\text{Ok})$$

Maka tulangan disusun satu lapis

Kontrol tulangan tumpuan:

$$a = \frac{A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{804 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 300} = 37,83$$

$$M_n = A_{s \text{ pakai}} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) = 804 \cdot 420 \left(544 - \frac{37,83}{2}\right) = 177310702,8 \text{ Nmm}$$

$$M_n = 177310702,8 \text{ Nmm} > M_{n \text{ awal}} = 4517380,28 \text{ Nmm} \quad (\text{Ok})$$

- **Syarat Pendetailan**

Syarat pendetailan penulangan lentur balok induk disesuaikan dengan peraturan SNI 2847:2019 sebagai berikut:

Pasal 18.6.1.

Gaya Tekan Aksial

$$P_u < \frac{A_g \cdot f_c'}{10}$$

$$0 < \frac{(300 \cdot 600)^{35}}{10}$$

$$0 < 630000 \text{ N} \quad (\text{Ok})$$

Bentang Bersih

$$\ell n \geq 4 \times \text{tinggi efektif}$$

$$5000 \geq 4 \times 544$$

$$5000 \geq 2176 \text{ mm} \quad (\text{Ok})$$

Perbandingan Ukuran Balok Induk

$$b_w \geq 0,3h$$

$$300 \geq 0,3 \cdot 600$$

$$300 \geq 180 \text{ mm} \quad (\text{Ok})$$

Jarak Tiap Sisi Komponen Struktur

$$\text{Lebar komponen struktur } C_2 = 500$$

$$0,75 \cdot C_2 = 0,75 \cdot 500 = 375$$

Dipakai yang terkecil yaitu 375 mm

Pasal 18.6.3.1

Luas Tulangan Minimal As min Tidak Boleh Kurang Dari :

$$A_{s \min} = \frac{0,25 \cdot \sqrt{f_c'}}{f_y} \cdot b_w \cdot d = \frac{0,25 \cdot \sqrt{35}}{420} \cdot 300 \cdot 544 = 574,70 \text{ mm}^2$$

Tidak boleh kurang dari :

$$A_{s \min} = \frac{1,4}{f_y} \cdot b_w \cdot d = \frac{1,4}{420} \cdot 300 \cdot 544 = 544 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan lentur terkecil yang dipakai yaitu $A_s = 603 \text{ mm}^2$, maka persyaratan diatas terpenuhi.

Syarat Batas Rasio Penulangan

$$\text{Syarat batas rasio penulangan } \rho < 0,025$$

Syarat ini terpenuhi karena menggunakan $\rho = 0,0105$, tidak lebih kecil dari $\rho_{\min}$ dan tidak melebihi $\rho_{\max}$.

$$\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$$

$$0,0033 \leq 0,0105 \leq 0,0249 \quad (\text{Ok})$$

Tulangan Menerus

Harus disediakan sedikitnya 2 tulangan menerus yang ditempatkan pada sisi atas dan sisi bawah. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, maka persyaratan ini terpenuhi mengingat jumlah tulangan pada daerah lapangan dan tumpuan sudah lebih dari atau sama dengan persyaratan diatas.

Tulangan Longitudinal Balok

Apabila tulangan longitudinal balok melewati join balok kolom, maka dimensi kolom yang sejajar dengan tulangan balok harus $> 20 \times$ diameter tulangan longitudinal balok terbesar.

Tinggi efektif balok induk > 20 tulangan longitudinal balok terbesar.

$$544 \text{ mm} > 20 \times 16 \text{ mm}$$

$$544 \text{ mm} > 320 \text{ mm} \quad (\text{Ok})$$

Penyusunan Tulangan Balok Induk (BI)

Jarak minimum antar 2 batang tulangan 16 mm, dengan minimum lebar balok yang diperlukan sebagai berikut:

$$\text{Lebar balok sengkang : } bw - (2 \cdot S) - (2 \cdot \emptyset \text{ sengkang}) = 300 - (2 \cdot 40) - (2 \cdot 8) = 204 \text{ mm. Sehingga tulangan 4D16 yang terdapat 1 lapis dipasang 4 buah tulangan:}$$

$$\text{Jarak dibutuhkan : } (4 \times 16) + (3 \times 16) = 112 \text{ mm} < 204 \text{ mm}$$

Dengan itu 1 lapis dapat di pasang 4 tulangan.

7.3.4. Penulangan Geser Balok Induk

- **Probable Moment Capacities (Mpr)**

Kapasitas momen – momen diujung balok apabila struktur bergoyang ke Mpr1:

$$a_{pr1} = \frac{1,25 \cdot A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{1,25 \cdot 804 \cdot 280}{0,85 \cdot 35 \cdot 300} = 31,52 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{pr1} &= 1,25 A_s f_y \cdot \left(d - \frac{a_{pr1}}{2} \right) \\ &= 1,25 \cdot 804 \cdot 280 \left(544 - \frac{31,52}{2} \right) \\ &= 148646736 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Kapasitas momen – momen diujung balok apabila struktur bergoyang ke Mpr2:

$$a_{pr2} = \frac{1,25 \cdot A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{1,25 \cdot 603 \cdot 280}{0,85 \cdot 35 \cdot 300} = 23,64 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{pr2} &= 1,25 A_s f_y \cdot \left(d - \frac{a_{pr2}}{2} \right) \\ &= 1,25 \cdot 603 \cdot 280 \left(544 - \frac{23,64}{2} \right) \\ &= 112316589 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$V_{sway} = \frac{m_{pr1} + m_{pr2}}{ln} = \frac{148646736 + 112316589}{5000} = 52192,665 \text{ kg/m} = 511980,04 \text{ N}$$

- **Mencari Nilai Beban Terfaktor (Wu)**

(Wu) adalah beban yang telah di ekuivalen seperti pada perhitungan beban balok anak lantai:

Beban mati :

Beban mati (DL) = 546 kg/m² dari beban mati pelat lantai

$$\begin{aligned} Q \text{ ekuivalen} &= DL \times \text{bentang balok terlebar} \times 2/3 \times 4 \\ &= 546 \times 5 \times 2/3 \times 4 \\ &= 7820 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat balok (BI)} &= 0,3 \times 0,6 \times 5 \times 2400 \\ &= 2160 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

$$W \text{ beban mati} = 7820 + 2160 = 9980 \text{ Kg/m}$$

Beban hidup :

Beban mati (DL) = 192 kg/m² dari beban mati pelat lantai

$$\begin{aligned} Q \text{ ekuivalen} &= DL \times \text{bentang balok terlebar} \times 2/3 \times 4 \\ &= 192 \times 5 \times 2/3 \times 4 \\ &= 2560 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

Kombinasi beban (SNI 2847:2019 Pasal 18.6.5 hal 384)

$$\begin{aligned} W_u &= 1,2D + 1,0LL \\ &= 1,2 (9980) + 1,0(2560) \\ &= 14536 \text{ Kg/m} \\ &= 1453,6 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

- **Gaya Geser Sesuai SNI 2847:2019**

Reaksi geser pada balok akibat gaya gravitasi diperoleh dari *Output* program bantu struktur yaitu:

$$V_u = 9410,36 \text{ N}$$

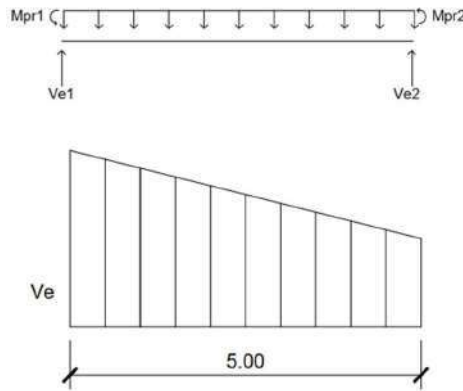
$$q_u = \frac{V_u \cdot 2}{ln} = \frac{9410,36 \cdot 2}{5} = 3764,14 \text{ Kg}$$

Struktur Begoyang Ke Mpr1:

$$V_{e \text{ Mpr1}} = V_{\text{sway}} + V_u = 511980,04 + 9410,36 = 521390,4 \text{ Kg}$$

Struktur Begoyang Ke Mpr2:

$$V_{e \text{ Mpr2}} = V_{\text{sway}} - V_u = 511980,04 - 9410,36 = 502569,68 \text{ Kg}$$



Gambar 7. 10 Diagram Geser

- **Syarat Pendetailan**

Syarat pendetailan tulangan geser balok induk mengacu pada SNI 2847:2019. Adapun syarat – syarat pendetailan tulangan geser antara lain adalah sebagai berikut:

- **Cek Syarat Geser**

Sebagaimana tercantum dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.6.5.2, gaya geser akibat gempa vertikal setengah kekuatan geser perlu maksimum dalam bentang tersebut.

$$V_{sway} \geq \frac{1}{2} \cdot V_e$$

$$511980,04 \geq \frac{1}{2} \cdot 521390,4$$

$$511980,04 \geq 26095,2 \text{ N} \quad (\text{Ok})$$

Dalam peraturan SNI 2847:2019 Pasal 18.6.5.2 juga disebutkan bahwa gaya tekan aksial terfaktor (P_u) termasuk pengaruh gempa kurang dari nilai berikut:

$$P_u < \frac{A_g \cdot f_c'}{20}$$

$$0 \text{ N} < \frac{(300 \cdot 600) \cdot 35}{20}$$

$$0 \text{ N} < 315000 \text{ N} \quad (\text{Ok})$$

- **Tulangan Geser Pada Daerah Sendi Plastis (Tumpuan)**

Dikarenakan kedua syarat diatas terpenuhi, maka kekuatan geser balok didesain dengan mengasumsikan $V_c = 0$, maka tulangan geser didaerah sendi plastis dihitung sebagai berikut:

$$V_{Smax} = \frac{2}{3} \times \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d$$

$$= \frac{2}{3} \times \sqrt{35} \cdot 300 \cdot 544$$

$$= 643669,48 \text{ N}$$

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c = \frac{9410,36}{0,75} - 0 = 12547,15 \text{ N}$$

$$V_s \leq V_{s_{\max}} = 12547,15 \text{ N} \leq 643669,48 \text{ N} \quad (\text{Ok})$$

Direncanakan spasi tulangan sengkang 2Ø8 kaki s=90mm, maka luas tulangan geser perlu adalah :

$$A_{v_{\text{perlu}}} = \frac{V_s \times s}{f_y \times d} = \frac{127543 \times 90}{280 \times 544} = 75,36 \text{ mm}^2$$

Direncanakan tulangan geser 2 kaki dengan tulangan Ø8 :

$$A_{v_{\text{pakai}}} = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48$$

$$A_{v_{\text{pakai}}} \geq A_{v_{\text{perlu}}} = 100,48 \geq 75,36 \quad (\text{Ok})$$

- Cek Syarat Geser Sesuai dengan SNI 2847 : 2019 Pasal 18.6.4.1 dan Pasal 18.6.4.4
Kedua ujung komponen lentur harus dipasang sengkang sepanjang jarak dua kali tinggi balok diukur dari muka perletakan ke arah tengah bentang. Sengkang pertama dipasang pada jarak $\leq 50 \text{ mm}$ dari perletakan. Spasi sengkang pengekang tidak boleh melebihi nilai terkecil dari ketiga persyaratan dibawah:

$$\text{a. } \frac{d}{4} = \frac{544}{4} = 136 \text{ mm}$$

$$\text{b. } 6 \times D_{\text{longitudinal}} = 6 \times 16 = 96$$

$$\text{c. } 150 \text{ mm}$$

Cek persyaratan jarak Sengkang

$$S_{\text{pakai}} < 96 \text{ mm}$$

$$90 \text{ mm} < 96 \text{ mm}$$

Maka digunakan tulangan geser sengkang 2Ø8 – 90 mm pada daerah tumpuan dipasang sejarak 50 mm dari ujung

- Tulangan geser pada daerah ujung sendi plastis (Lapangan)

$$V_c = 0,17 \sqrt{f_c'} \times b \times d = 0,17 \sqrt{35} \times 300 \times 544 = 164135,72 \text{ N}$$

Gaya geser yang terjadi pada daerah ujung sendi plastis adalah:

$$V_u = V_e - (q_u \times 2h) = 521390,4 - (3764,14 \times (2 \times 0,6)) = 516873,81 \text{ N}$$

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c = \frac{516873,81}{0,75} - 164135,72 = 525029,36 \text{ N}$$

Direncanakan spasi tulangan sengkang 2Ø8 kaki s = 100 mm, maka luas tulangan geser perlu adalah :

$$A_{v_{\text{perlu}}} = \frac{V_s \times s}{f_y \times d} = \frac{525029,36 \times 100}{280 \times 544} = 34,62 \text{ mm}^2$$

Direncanakan tulangan geser 2 kaki dengan tulangan Ø8 :

$$A_{v_{\text{pakai}}} = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 = 2 \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 8^2 = 100,48$$

$$A_{vpakai} \geq A_{vperlu} = 100,48 \geq 34,62 \quad (\text{Ok})$$

- Cek Syarat Geser Sesuai dengan SNI 2847 : 2019 Pasal 18.6.4.6

Bila Sengkang pengekang tidak diperlukan, Sengkang harus dipasang sepanjang bentang balok dengan spasi tidak boleh melebihi $d/2$.

Cek persyaratan :

$$S_{pakai} < d/2$$

$$100 \text{ mm} < \frac{544}{2}$$

$$100 \text{ mm} < 272 \text{ mm}$$

Maka digunakan tulangan geser 2Ø8 kaki $s = 100 \text{ mm}$ pada daerah lapangan balok.

7.3.5. Penulangan Torsi Balok Induk

- **Periksa Kecukupan Penampang**

Sebagaimana diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 22.7.7.1, dimensi penampang harus dipilih sedemikian rupa sehingga persyaratan berikut:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 \cdot A_{oh}^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b \cdot d} + 0,66 \sqrt{f_c'}\right)$$

Nilai torsi maksimum dan geser maksimum didapat dari *Output* hasil Analisa struktur sebagai berikut:

$$T_u = 16085,95 \text{ Nmm}$$

$$V_u = 9410,36 \text{ N}$$

Dimana;

$$V_c = 0,17 \sqrt{f_c'} \times b \times d = 0,17 \sqrt{35} \times 300 \times 544 = 164135,71 \text{ N}$$

$$b_h = b - 2 \cdot t_s - D_{geser} = 300 - (2 \cdot 40) - 8 = 212 \text{ mm}$$

$$h_h = h - 2 \cdot t_s - D_{geser} = 600 - (2 \cdot 40) - 8 = 512 \text{ mm}$$

$$A_{oh} = b_h \cdot h_h = 212 \cdot 512 = 108544 \text{ mm}^2$$

$$P_h = 2 (b_h + h_h) = 2 (212 + 512) = 1448 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$\sqrt{\left(\frac{9410,36}{300 \cdot 544}\right)^2 + \left(\frac{16085,95 \cdot 1448}{1,7 \cdot 108544^2}\right)^2} \leq 0,75 \left(\frac{164135,71}{300 \cdot 544} + 0,66 \sqrt{35}\right)$$

$$3,17 \text{ MPa} \leq 3,68 \text{ MPa} \quad (\text{Ok})$$

- **Periksa Persyaratan Pengaruh Puntir**

Tulangan torsi harus di cek menggunakan persyaratan pada SNI 2847:2019 Tabel 22.7.4.1.

Dimana:

$$A_{cp} = b \cdot h = 300 \cdot 600 = 180000 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2(b+h) = 2(300+600) = 1800 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$T_n = 0,083 \lambda \cdot \sqrt{f_c'} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right)$$

$$T_n = 0,083 \cdot 1 \cdot \sqrt{35} \left(\frac{180000^2}{1800} \right)$$

$$T_n = 8838623,19 \text{ Nmm}$$

$$\text{Momen torsi terfaktor } \phi T_n = 0,75 \times 8838623,19 = 66289673,93 \text{ Nmm}$$

Karena $\phi T_n > T_u = 66289673,93 > 16085.95 \text{ Nmm}$, maka torsi pada balok diabaikan.

10

Tabel 7. 5 Rekapitulasi Balok Induk

Tipe	Balok Induk 30/60	
Letak	Tumpuan	Lapangan
Tulangan Atas	4D16	3D16
Tulangan Samping	2D12	2D12
Tulangan Bawah	3D16	4D16

7.5. Perencanaan Kolom

Perencanaan kolom pada apartemen Az-Zahr ini, ditinjau dengan kolom dan akan membahas mengenai desain penulangan kolom, kontrol kekuatan kolom menggunakan program struktur serta pendetailan kolom sesuai dengan peraturan. Berikut data perencanaan kolom untuk perhitungan kolom

$$\text{Mutu beton} = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Mutu tulangan} = 420 \text{ MPa}$$

$$\text{Tinggi Kolom} = 4000 \text{ mm}$$

$$\text{Selimut beton} = 50 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter tulangan} = D22$$

$$\text{Diameter sengkang} = D13$$

$$d = 500 - 50 - 13 - \frac{1}{2} \times 22 = 426 \text{ mm}$$

3

7

Tabel 7. 6 Tabel Gaya Dalam Kolom

	FX (kgf)	FZ (kgf)	MX (Nmm)	MY (Nmm)	Fx/Ax (MPa)	Deformation (mm)	Exact deformation(s)
Line type (color)							
Scale : (cm) =	509.86	2039.43	200000.00	25000000.00	10.00	Zero	Zero
MAX	290039.06	4102.66	401562.63	81324599.97	11.38	10.29	10.29
Member	58	3356	3791	3356	58	3753	3753
Point	x = 0.0000	x = 0.0000	x = 0.0000	x = 1.0000	x = 0.0000	x = 1.0000	x = 1.0000
Case	13	13	13	13	13	13	13
MIN	7002.21	-4102.46	-401563.95	-81320751.83	0.27	0.0	0.0
Member	105	3281	3800	3281	105	3753	3753
Point	x = 1.0000	x = 0.0000	x = 0.0000	x = 1.0000	x = 1.0000	x = 0.0000	x = 0.0000
Case	13	13	13	13	13	13	13

6

Dari tabel diperoleh nilai gaya – gaya dalam untuk kolom berdasarkan hasil analisa pemodelan struktur 3D dengan program RSAP sebagai berikut :

$$P_u = 290039,06 \text{ kgf} = 2844311,55 \text{ N}$$

$$V_u = 4102.66 \text{ kgf} = 40.2334 \text{ kN} = 4023335,07 \text{ N}$$

$$M_1 = 401562,63 \text{ Nmm}$$

$$M_2 = 81324599,97 \text{ Nmm}$$

$$\Delta_o = 0,19 \text{ mm}$$

$$Q = \frac{P_u \times \Delta_o}{V_u \times L_c} < 0,05$$

$$= \frac{2844311,55 \times 0,19}{4023335,07 \times 4000} < 0,05$$

$$= 0.000034 < 0,05 \text{ maka termasuk kolom } non \text{ sway}$$

7.5.1. Desain Tulangan Memanjang Kolom

- Kontrol Kelangsingan Kolom**

$$\text{Kolom } 500 \times 500 \text{ mm}^2$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c}$$

$$= 4700 \sqrt{35}$$

$$= 27805,57$$

$$I_g = 0,7 \cdot (1/12) \cdot b \cdot h^3$$

$$= 0,7 \cdot (1/12) \cdot 500 \cdot 500^3$$

$$= 3645833333 \text{ mm}^4$$

$$\text{Balok Induk } 300 \times 600 \text{ mm}^2$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c}$$

$$= 4700 \sqrt{35}$$

$$= 27805,57$$

$$\begin{aligned} I_g &= 0,7 \cdot (1/12) \cdot b \cdot h^3 \\ &= 0,7 \cdot (1/12) \cdot 300 \cdot 600^3 \\ &= 3780000000 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Selanjutnya, menghitung factor panjang tekuk kolom (k) dengan persamaan berikut ini:

Kekakuan Kolom Atas

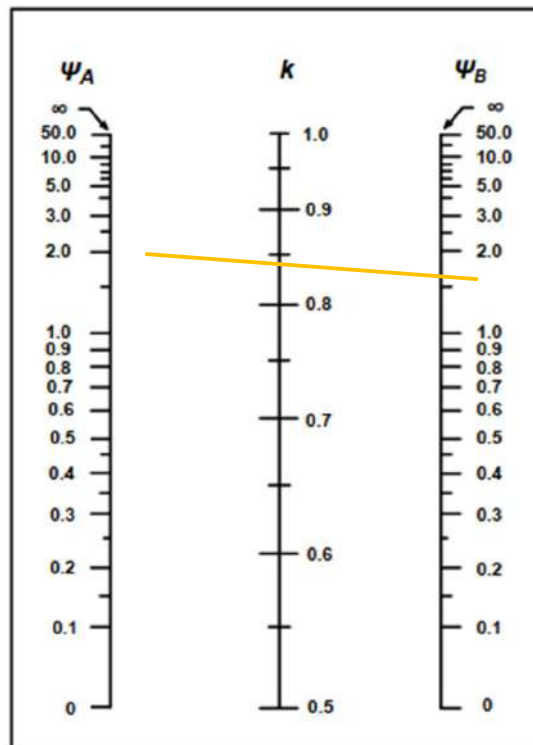
$$\Psi_A = \frac{\frac{E_c \times I_{kolom}}{I_{bawah}} + \frac{E_c \times I_{kolom}}{I_{atas}}}{\frac{E_c \times I_{balok x}}{I_{bawah}} + \frac{E_c \times I_{balok x}}{I_{atas}}}$$

$$\Psi_A = \frac{\frac{27805,57 \times 364583333}{4000} + \frac{27805,57 \times 364583333}{4000}}{\frac{27805,57 \times 3780000000}{5000} + \frac{27805,57 \times 3780000000}{5000}}$$

$$\Psi_A = 1,20$$

Kekakuan Kolom Bawah

$$\Psi_B = 1,00$$



Gambar 7. 11 Nomogram Faktor Kekakuan Kolom (Struktur Tidak Bergoyang)

Setelah ditarik garis pada nomogram diatas akan mendapatkan nilai panjang efektif (K)
 $= 0,78 \leq 1,00$

Jari – jari Inersia (r)

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 6.2.5.1, radiud girasi (r), diizinkan untuk dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$r = 0,3b$$

Kontrol Kelangsingan

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 6.2.5, pengaruh kelangsingan kolom dapat diabaikan jika memenuhi persamaan sebagai berikut:

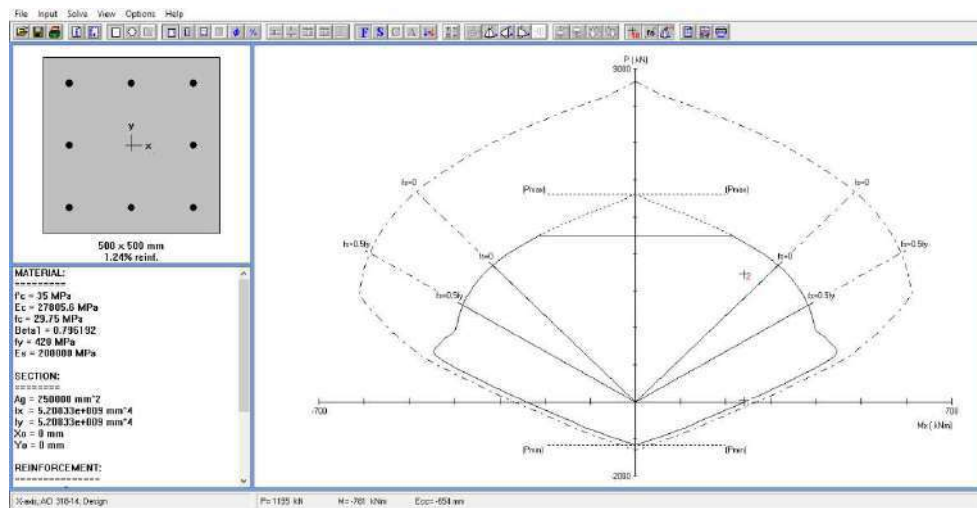
Untuk struktur tidak bergoyang

$$\frac{Klu}{r} \leq 34 - 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \leq 40$$

$$\frac{0,78 \cdot 4000}{0,8 \times 500} \leq 34 - 12 \left(\frac{401562,63}{81324599,97} \right) \leq 40$$

$$20,8 \leq 33,94 \leq 40$$

Maka, kelangsingan kolom diabaikan



Gambar 7. 12 Output analisa Kolom Menggunakan SPColumn

Berdasarkan hasil desain menggunakan program komputer dengan gaya dalam dengan dimensi kolom 500 x 500 mm, diperoleh konfigurasi penulangan 8D22. Berdasarkan konfigurasi tersebut, maka diperoleh rasio tulangan $\rho = 1,24\% = 0,0124$ sehingga $0,001 < \rho < 0,06 = 0,001 < 0,0124 < 0,06$ terpenuhi.

7.5.2. Perhitungan Kuat Tekan Maksimal Kolom

Sebagaimana dinyatakan dalam SNI 2847:2019 Pasal 11.4.2.1 menyatakan bahwa komponen struktur non-prategang dengan tulangan sengkang pengikat, gaya aksial terfaktor (P_u) tidak boleh lebih dari:

$$A_{st} = 8 \cdot (0,22 \cdot 3,14 \cdot (22^2)) = 2674,7776$$

$$\begin{aligned}\phi P_n \max &= 0,80 \cdot \phi (0,85 \cdot f_c' (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}) \\ &= 0,80 \cdot 0,75 (0,85 \cdot 35 (250000 - 2674,7776)) + 420 \cdot 2674,7776 \\ &= 5538161,812 \text{ N}\end{aligned}$$

Hasil $\phi P_n \max = 5538161,812 \text{ N} > P_u = 2844311,55 \text{ N}$ (*Output* pada RSAP) maka diperbolehkan menggunakan gaya P_u hasil *Output* RSAP.

7.5.3. Syarat Pendetailan Kolom

Sebagaimana dinyatakan dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.7.2, kolom pada sistem rangka pemikul momen khusus harus memenuhi persyaratan berikut:

Pasal 18.7.2.1

- 1) Dimensi penampang terkecil diukur pada garis lurus yang melalui pusat geometri dan tidak kurang dari 300 mm.

$$b \geq 300 \text{ mm}$$

$$500 \geq 300 \text{ mm} \quad (\text{Ok})$$

- 2) Rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

$$\frac{h}{b} \geq 0,4$$

$$\frac{500}{500} \geq 0,4$$

$$1 \geq 0,4 \quad (\text{Ok})$$

Pasal 18.7.5.6

- 1) Beban aksial tekan terfaktor

$$(P_u) > \frac{A_g \cdot f_c}{10}$$

$$(P_u) > \frac{(500 \times 500) \cdot 35}{10}$$

$$2844311,55 > 875000 \quad (\text{Ok})$$

7.5.4. Pendetailan Kolom Strong Column Weak Beam

Sesuai filosofi “*Capacity Design*” maka pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3.2, persyaratan $\sum M_{nc} \geq (1,2) \sum M_{nb}$ harus dipahami bahwa M_{nc} harus memenuhi gaya aksial terfaktor yang menghasilkan gaya lentur minimum sesuai dengan arah gempa yang ditinjau. Dalam hal ini kombinasi beban yang digunakan hanya kombinasi dengan beban gempa saja untuk memeriksa persyaratan *Strong Coloumn Weak Beam*.

Jumlah $\sum M_{nb}$ adalah M_{nb}^+ dan M_{nb}^- balok yang menyatu dengan kolom, dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut:

$$M_{nb} = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b}$$

Pada kolom terdapat balok dan pelat lantai yang menyatu juga sehingga dalam menghitung M_{nb}^+ harus mengikut sertakan luas tulangan pelat dan selebar efektif.

$$d'' \text{ balok} = S + \emptyset \text{tulangan sengkang} + \emptyset \text{tulangan utama} + \left(\frac{\sum \text{tul.bawah}}{\sum \text{tul.atas}} \times \text{jarak tul. utama} \right)$$

$$d'' \text{ balok} = 40 + 8 + 16 + \left(\frac{3}{4} \times 25 \right) = 82,8 \text{ mm}$$

Jarak antar A_s tulangan pada balok induk dan pelat :

$$\text{Atas} = d'' \text{ balok} - \text{jarak tulangan pelat} - \left(\frac{1}{2} \cdot \emptyset \text{tulangan pelat} \right)$$

$$= 82,8 - 20 - \left(\frac{1}{2} \cdot 10 \right) = 57,8 \text{ mm}$$

$$\text{Bawah} = \text{tebal pelat} - d'' \text{ balok} - \text{jarak tulangan pelat} - \left(\frac{1}{2} \cdot \emptyset \text{tulangan pelat} \right)$$

$$= 120 - 82,8 - 20 - \left(\frac{1}{2} \cdot 10 \right) = 37,2$$

$$b_e = \frac{1}{12} \times 500 = 41,7 \text{ mm}$$

$$A_{s_{\text{atas}}} = A_{s_{\text{balok atas}}} + \left[2 \times \left(\frac{b_e}{\text{jarak tul.pelat}} \right) \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \emptyset \text{tul.pelat}^2 \right]$$

$$= 804 + \left[2 \times \left(\frac{41,7}{150} \right) \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 10^2 \right]$$

$$= 847,65 \text{ mm}^2$$

Karena balok bagian bawah tidak terdapat pelat, maka :

$$A_{s_{\text{bawah}}} = A_{s_{\text{balok bawah}}} = 402 \text{ mm}^2$$

$$D_{\text{atas}} = d_{\text{balok}} - \left[\left(\frac{A_s \text{ pelat}}{A_s \text{ atas}} \right) \times 75,5 \right] + \left[\left(\frac{A_s \text{ pelat}}{A_s \text{ atas}} \right) \times 19,5 \right]$$

$$= 544 - \left[\left(\frac{524}{847,65} \right) \times 75,5 \right] + \left[\left(\frac{524}{847,65} \right) \times 19,5 \right]$$

$$= 509,38 \text{ mm}^2$$

$$d_{\text{bawah}} = d_{\text{balok}} = 544 \text{ mm}$$

Mnb⁻ (atas)

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{847,65 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 300} = 39,88 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{nb}^- &= A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \\ &= 847,65 \cdot 420 \cdot \left(509,38 - \frac{39,88}{2}\right) \\ &= 174247002,7 \text{ Nmm} = 174,24 \text{ kNm} \end{aligned}$$

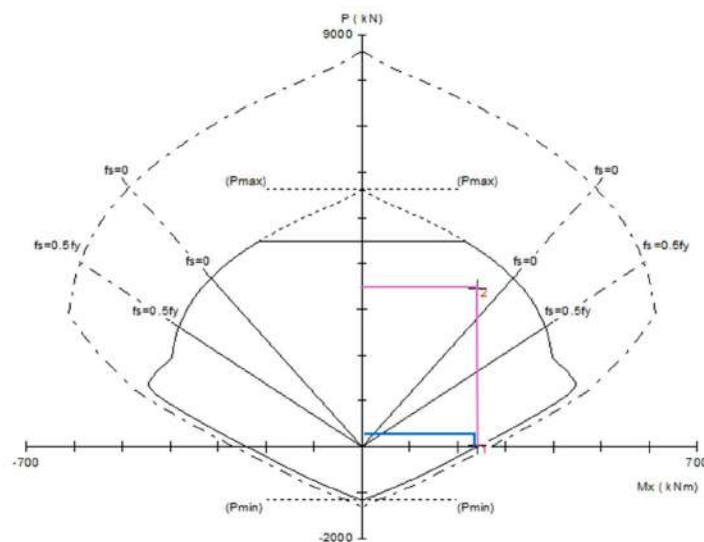
Mnb⁺ (bawah)

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{402 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 300} = 18,91 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{nb}^+ &= A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \\ &= 402 \cdot 420 \cdot \left(544 - \frac{18,91}{2}\right) \\ &= 90252577,8 \text{ Nmm} = 90,25 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_{nb} &= M_{nb}^- + M_{nb}^+ \\ &= 174,24 + 90,25 = 264,49 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Nilai Mnc pada kolom didapat dengan SpColumn dengan menarik garis lurus sumbu Y ke titik Pu yang telah ditentukan dan setelah garis menyinggung garis interaksi, maka garis dapat ditarik lagi menuju sumbu X sehingga didapatkan nilai Mnc.



Gambar 7.13 Diagram Interaksi Gaya Aksial dan Momen Pada Garis spColumn Nilai Mnc

Setelah nilai Mnc ditentukan, kedua nilai tersebut harus dijumlahkan dan dibandingkan sesuai persyaratan *Strong Coloumn Weak Beam*.

Nilai Mnc dapat ditentukan dari Gambar 6.10, sebagai berikut:

$$\sum M_{nc} = 246 + 335 = 581 \text{ kNm}$$

Untuk persyaratan *Strong Coloumn Weak Beam* yang harus sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3.2, sebagai berikut:

$$\sum M_{nc} \geq (1,2) \sum M_{nb}$$

$$\left(\frac{581}{0,65} \right) \geq 1,2 \cdot \left(\frac{264,49}{0,8} \right)$$

$$893 \text{ kNm} \geq 396 \text{ kNm} \quad (\text{OK})$$

Dengan terpenuhinya persyaratan ini, dapat disimpulkan bahwa semua kolom pada struktur bangunan ini termasuk dalam sistem penahan gempa.

7.5.5. Perhitungan Tulangan Confinement

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.1, tulangan transversal harus dipasang sepanjang I_0 dan panjang I_0 tidak boleh kurang dari nilai terbesar dari ketiga persamaan berikut:

- Tinggi komponen struktur pada muka join : $h = 600 \text{ mm}$
- $1/6$ tinggi bersih kolom = $1/6 \times (4000 - 600) = 566 \text{ mm}$
- 450 mm

Sehingga diambil pengekan terpanjang $I_0 = 600 \text{ mm}$ dari muka tumpuan

- Jarak bentang pemasang sengkang dari muka tumpuan kolom. Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.3 menyatakan bahwa spasi maksimum tulangan transversal sepanjang I_0 tidak boleh melebihi yang terkecil dari :

$$\text{a. } \frac{1}{4} \times \text{dimensi kolom} = \frac{1}{4} \times 500 = 125 \text{ mm}$$

$$\text{b. } 6 \times \text{diameter batang tulang utama} = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$$

- Jarak pada sengkang. So sebagai berikut:

$$So = 100 + \left(\frac{350-125}{3} \right) = 100 + \left(\frac{350-125}{3} \right) = 175 \text{ mm}$$

Nilai So tidak boleh melebihi 150 mm dan tidak perlu kurang dari 100 mm. Jarak sengkang yang digunakan = 125 mm

- Jarak sengkang yang digunakan

Ambil jarak sengkang $s = 125 \text{ mm}$

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.10.7.4 menyatakan bahwa luas penampang total tulangan sengkang persegi tidak boleh kurang dari:

$$A_{sh} = 0,3 \left[\left(\frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \frac{s \cdot bc \cdot f_c}{f_{yt}} \text{ atau } A_{sh} = 0,09 \frac{s \cdot bc \cdot f_c}{f_{yt}}$$

Keterangan:

s = spasi pada tulangan transversal (mm)

bc = dimensi penampang inti kolom yang diukur dari tepi luar tulangan pengejang (mm)

A_g = luas bruto penampang (mm^2)

A_{ch} = luas penampang pada komponen struktur yang diukur sampai tepi luar tulangan sengkang (mm^2)

$$A_{sh} = 0,3 \left[\left(\frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \frac{s \cdot bc \cdot f_c'}{f_{yt}}$$

$$A_{sh} = 0,3 \left[\left(\frac{500 \times 500}{(500 - (2 \times 50))^2} \right) - 1 \right] \frac{125 \cdot (500 - ((2 \times 50) - 8)) \cdot 35}{420} = 717,18 \text{ mm}^2$$

Atau

$$A_{sh} = 0,09 \frac{s \cdot bc \cdot f_c'}{f_{yt}}$$

$$A_{sh} = 0,09 \frac{125 \cdot (500 - ((2 \times 50) - 8)) \cdot 35}{420} = 367,5 \text{ mm}^2$$

Nilai luas sengkang yang digunakan adalah $717,18 \text{ mm}^2$, sehingga untuk memenuhi kebutuhan luas tulangan sengkang dipakai 4 kaki dengan diameter tulangan sengkang 13 mm (4D13), oleh karena itu luas tulangannya sebagai berikut:

$$A_{sh} = 4 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 = 530,92 \text{ mm}^2 \geq 367,5 \text{ mm}^2$$

Sisa panjang pada kolom yang berada diluar sendi plastis dipasang sengkang sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.10.7.4 jarak pada sengkang tidak boleh lebih dari :

$$s \leq 6 \times db$$

$$s \leq 6 \times 22$$

$$s \leq 132 \text{ mm}$$

maka diambil jarak diluar sendi plastis 125 mm

3) Sengkang kolom pada muka *joint*

a. Pakai sengkang 4D13-100

b. Dipasang sejauh 600 mm dari muka *joint*

c. Jumlah sengkang $\frac{600}{100} = 6$ buah

- d. Sengkang pertama dipasang pada jarak 50 mm dari muka tumpuan
- 4) Sengkang pada kolom setelah jarak 600 mm
- Pakai sengkang 4D13-125 mm
 - Dipasang sejauh 600 mm dari muka *joint*
 - Jumlah sengkang = $\frac{(4000-600)-(2 \times 500)}{125} + 1 = 20$ buah

7.5.6. Perhitungan Tulangan Geser

Berdasarkan pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7.6.1.1 dikatakan gaya geser desain (V_e) menggunakan momen maksimum yang mungkin (M_{pr}) dan gaya V_e tidak boleh berkurang dari geser terfaktor yang ditentukan dalam analisa struktur dengan rumus:

$$V_e = \frac{M_{pr3} + M_{pr4}}{l_u}$$

Sehingga gaya dari M_{pr} wajib dihitung berdasarkan tulangan terpasang pada kolom, sedang l_u adalah panjang yang tidak tertumpu dari kolom yang nilainya didapat dengan pengurangan antara kolom dengan tinggi balok.

Nilai M_{pr} Kolom

Tulangan terpasang: $A_s = 8D22 = 3041 \text{ mm}^2$

$$a = \frac{A_s \cdot 1,25 \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} = \frac{3041 \cdot 1,25 \cdot 420}{0,85 \cdot 35 \cdot 500} = 107,32 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} M_{pr} &= A_s \times 1,25 \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \\ &= 3041 \times 1,25 \times 420 \times \left(426 - \frac{107,32}{2}\right) \\ &= 594450118,5 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Gaya geser kolom yaitu :

$$V_e \text{ kolom} = \frac{594450118,5 + 594450118,5}{4000 - 600} = 349676,54 \text{ N} = 349,68 \text{ kN}$$

Gaya geser maksimum dari *Output* RSAP untuk kolom diperoleh yang terbesar yaitu 96351 N. Karena kondisi balok dan kolom (HBK) dan persyaratan pada *Strong Coloumn Weak Beam* telah terpenuhi maka nilai geser (V_u) harus lebih kecil dari gaya geser kolom terbesar, untuk mengetahui gaya geser pada balok dapat melihat 6.4.2.

$$M_{pr1} = 530881,2 \text{ Nmm}$$

$$M_{pr2} = 386055,68 \text{ Nmm}$$

Gaya geser balok yaitu:

$$V_e = \frac{(530881,2 \times 0,5) + (386055,68 \times 0,5)}{4000 - 600} = 134,84 \text{ N} = 0,13 \text{ kN}$$

Dikarenakan:

$$V_e \text{ balok} \leq V_e \text{ Output RSAP} \leq V_e \text{ kolom}$$

$$0,13 \text{ kN} \leq 40.2334 \text{ kN} \leq 349,68 \text{ kN}$$

Digunakan nilai $V_e = 40,2334 \text{ kN}$

Sebagaimana tercantum didalam SNI 2847:2019 Pasal 18.7.6.2.1, tulangan transversal didesain untuk menahan gaya geser dengan mengasumsikan nilai $V_c = 0$, apabila:

$$V_e \geq 0,5 V_e \text{ kolom}$$

$$40,2334 \text{ kN} \geq 0,5 \cdot 349,68$$

$$96,35 \text{ kN} \leq 174,84 \text{ kN} \quad (\text{Tidak OK})$$

$$P_u < \frac{A_g \cdot f_c}{20}$$

$$3455699 \text{ N} < \frac{(500 \times 500) \cdot 35}{20}$$

$$3455699 \text{ N} > 437500 \quad (\text{Tidak OK})$$

Karena kedua syarat tidak dipenuhi, maka tidak bisa diasumsikan $V_c=0$, maka nilai V_c harus dihitung sebagai berikut:

$$N_u = 3455699 / 1000 = 3455,699$$

$$\lambda = 1$$

$$A_g = 250000 \text{ mm}^2$$

$$\sqrt{f_c'} = 5,916079783$$

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 \cdot A_g} \right) \lambda \sqrt{f_c'} b d \\ &= 0,17 \left(1 + \frac{3455,699}{14 \cdot 250000} \right) 1 \cdot \sqrt{35} \cdot 500 \cdot 426 \\ &= 214432,76 \text{ N} \end{aligned}$$

Sehingga:

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{s}$$

Dikarenakan sebelumnya tulangan *confinement* 4 kaki D13 - 100, maka:

$$V_s = \frac{530,92 \cdot 420 \cdot 426}{100} = 949922,07 \text{ N}$$

Sehingga:

$$\phi(V_c + V_s) \geq V_e \text{ kolom}$$

$$0,75 \cdot (214432,76 + 949922,07) \geq 349676,54$$

$$873,266 \text{ kN} \geq 349,68 \text{ kN}$$

Sengkang harus dipasang disepanjang bentang kolom dengan spasi tidak boleh melebihi $d/2 = 426 / 2 = 213 \text{ mm}$, sehingga terdapat jumlah kaki atau spasi dalam sengkang kolom.

- 1) Sengkang kolom pada muka *joint*
 - a. Pakai sengkang 4D13-100
 - b. Dipasang sejauh 600 mm dari muka *joint*
 - c. Jumlah sengkang $\frac{600}{100} = 6$ buah
 - d. Sengkang pertama dipasang pada jarak 50 mm dari muka tumpuan
- 2) Sengkang pada kolom setelah jarak 600 mm
 - a. Pakai sengkang 4D13-125 mm
 - b. Dipasang sejauh 600 mm dari muka *joint*
 - c. Jumlah sengkang $= \frac{(4000-600)-(2 \times 500)}{125} + 1 = 20$ buah

7.5.7. Sambungan Lewatan Tulangan Pada Kolom

Sambungan yang terdapat pada tulangan kolom yang telah dilakukan ditengah kolom harus memenuhi ketentuan panjang lewatan yang telah ditentukan oleh persyaratan 2847:2019 Pasal 25.4.2.3, dengan rumusan dibawah ini:

$$\begin{aligned}
 l_d &= 1,3 \left(\frac{f_y \cdot \psi_t \cdot \psi_e}{1,7 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c}} \right) \cdot db \\
 &= 1,3 \left(\frac{420 \cdot 1 \cdot 1}{1,7 \cdot 1 \cdot \sqrt{35}} \right) \cdot 22 \\
 &= 1194,36 \text{ mm} \approx 1200 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

7.6. Desain Hubungan Balok Kolom

Sebagai contoh perhitungan HBK, ditinjau pada salah satu join yang terletak pada lantai satu, sebagaimana dilihat berikut:

- **Cek Persyaratan Dimensi Kolom**

Sebagaimana tercantum di dalam peraturan SNI 2847:2019 Pasal 18.8.2.3, apabila tulangan longitudinal balok diteruskan melalui join balok kolom, maka dimesi kolom yang parallel dengan tulangan balok tersebut tidak boleh kurang dari 20 kali diameter tulangan longitudinal tersebar dari balok tersebut.

$$500 \geq 20 \cdot D_{\text{balok}}$$

$$500 \geq 20 \cdot 22$$

$$500 \text{ mm} \geq 440 \text{ mm} \quad (\text{Ok})$$

- **Luas Efektif Join**

Luas efektif join (A_j), seperti yang tercantum di dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.8.4.3 dihitung berdasarkan perumusan dibawah ini:

$$A_j = h \cdot b_{\text{efektif}}$$

Tinggi join harus diambil sebesar lebar kolom (h), sedangkan lebar efektif join diambil dari terkecil dari lebar balok ditambah tinggi join dan dua kali jarak tegak lurus yang lebih kecil dari sumbu longitudinal balok ke sisi kolom seperti pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned} b_{\text{efektif}} &= b + h \leq b + 2x \\ &= 300 + 600 \leq 300 + 2 \left(\frac{600-300}{2} \right) \\ &= 900 \leq 600 \text{ mm} \\ &= 600 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$A_j = h \cdot b_{\text{efektif}} = 600 \cdot 600 = 360000 \text{ mm}^2$$

- **Cek Persyaratan Tulangan Transversal**

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.8.3.2, bila keempat sisi *joint* terdapat balok yang merangka kepadanya dan lebar balok tidak kurang dari $\frac{3}{4}$ lebar kolom, maka jumlah tulangan *confinement* dapat direduksi setengahnya. Berdasarkan pasal tersebut, spasi tulangan *confinement* dapat diperbesar hingga 150 mm.

$$\begin{aligned} b_{\text{balok}} &\geq \frac{3}{4} b_{\text{kolom}} \\ 300 \text{ mm} &\geq \frac{3}{4} \cdot 500 \text{ mm} \\ 300 \text{ mm} &\leq 375 \text{ mm} \end{aligned}$$

Sehingga jumlah tulangan *confinement* tidak perlu direduksi setengahnya dan spasi tulangan *confinement* tidak perlu diperbesar menjadi 150 mm.

7.6.1. Desain Hubungan Balok Kolom Terkekang Empat Balok

- **Cek Gaya Geser Pada Join**

Gaya geser pada join dihitung menggunakan momen probabilitas (M_{pr}) tulangan atas dan tulangan bawah balok dengan nilai $DF = 0,5$

$$\begin{aligned} M_c &= DF (M_{pr1} + M_{pr2}) \\ &= 0,5 (530881,2 + 386055,68) \\ &= 458468,44 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Dari nilai M_c tersebut, selajutnya dapat ditentukan V_{sway} yang merupakan hasil dari penjumlahan M_c atas dan M_c bawah dibagi dengan tinggi bersih kolom.

$$V_{sway} = \frac{M_c + M_c}{lu} = \frac{458468,44 + 458468,44}{3400} = 269,69 \text{ N}$$

Geser pada join juga disebabkan oleh gaya tekan dan tarik pada tulangan longitudinal balok.

- Gaya tarik yang bekerja pada tulangan balok di bagian kiri join

$$T_1 = 1,25 \cdot A_s \cdot f_y = 1,25 \cdot 804 \cdot 420 = 422100 \text{ N}$$

- Gaya tekan yang bekerja pada bagian kiri join

$$C_1 = T_1 = 422100 \text{ N}$$

- Gaya tarik yang bekerja pada tulangan balok dibagian kanan join

$$T_2 = 1,25 \cdot A_s \cdot f_y = 1,25 \cdot 804 \cdot 420 = 422100 \text{ N}$$

- Gaya tekan yang bekerja pada bagian kanan join

$$C_2 = T_2 = 422100 \text{ N}$$

Maka total gaya geser yang bekerja pada join dapat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_u &= T_1 + C_2 - V_{sway} = 422100 + 422100 - 269,69 \\ &= 843930,31 \text{ N} \end{aligned}$$

- **Kapasitas Kuat Geser Join**

Sebagaimana tercantum dalam peraturan SNI 2847:2019 Pasal 18.8.4.1, kapasitas kekuatan geser nominal pada join (V_n) dengan join yang terkekang balok pada keempat sisinya dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$V_n = 1,7 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c'} \cdot A_j = 1,7 \cdot 1 \cdot \sqrt{35} \cdot 360000 = 3620640,82 \text{ N}$$

$$\phi V_n \geq V_u$$

$$0,75 \cdot 3620640,82 \geq 843930,31 \text{ N}$$

$$2715480,61 \text{ N} \geq 843930,31 \text{ N} \quad (\text{Ok})$$

7.7.1. Desain Hubungan Balok Kolom Terkekang Tiga atau Dua Balok

- **Cek Gaya Geser Pada Join**

Gaya geser pada join dihitung menggunakan momen probabilitas (M_{pr}) tulangan atas dan tulangan bawah balok dengan nilai $DF = 0,5$

$$M_c = DF (M_{pr1})$$

$$= 0,5 (530881,2)$$

$$= 265440,6 \text{ Nmm}$$

Dari nilai M_c tersebut, selajutnya dapat ditentukan V_{sway} yang merupakan hasil dari penjumlahan M_c atas dan M_c bawah dibagi dengan tinggi bersih kolom.

$$V_{sway} = \frac{M_c + M_c}{l_u} = \frac{265440,6 + 265440,6}{3400} = 156,14 \text{ N}$$

Geser pada join juga disebabkan oleh gaya tekan dan tarik pada tulangan longitudinal balok.

➤ Gaya tarik yang bekerja pada tulangan balok di bagian kiri join

$$T_1 = 1,25 \cdot A_s \cdot f_y = 1,25 \cdot 804 \cdot 420 = 422100 \text{ N}$$

➤ Gaya tekan yang bekerja pada bagian kiri join

$$C_1 = T_1 = 422100 \text{ N}$$

Maka total gaya geser yang bekerja pada join dapat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_u &= T_1 - V_{sway} = 422100 - 269,69 \\ &= 421830,31 \text{ N} \end{aligned}$$

- **Kapasitas Kuat Geser Join**

Sebagaimana tercantum dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.8.4.1, kapasitas kekuatan geser nominal pada join (V_n) dengan join yang terkekang balok pada keempat sisinya dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$V_n = 1,7 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c'} \cdot A_j = 1,7 \cdot 1 \cdot \sqrt{35} \cdot 360000 = 3620640,82 \text{ N}$$

$$\phi V_n \geq V_u$$

$$0,75 \cdot 3620640,82 \geq 421830,31 \text{ N}$$

$$2715480,61 \text{ N} \geq 421830,31 \text{ N} \quad (\text{Ok})$$

Tabel 7. 7 Rekapitulasi Pengecekan SCWB pada HBK Interior dan Eksterior Tiap Lantai

Lantai	Tipe HBK	AS	$\sum M_{nc}$	$\sum M_{nb}$	$1,2\sum M_{nb}$	Status
Atap	Interior	C-3	240.20	95.80	114.96	OK
	Eksterior	A-3	145.60	185.40	222.48	OK
Lantai 10	Interior	C-3	432.70	161.20	193.44	OK
	Eksterior	A-3	251.10	320.50	384.60	OK
Lantai 9	Interior	C-3	468.20	161.20	193.44	OK
	Eksterior	A-3	275.40	320.50	384.60	OK
Lantai 8	Interior	C-3	502.50	172.40	206.88	OK
	Eksterior	A-3	298.30	342.10	410.52	OK
Lantai 7	Interior	C-3	535.10	172.40	206.88	OK
	Eksterior	A-3	321.60	342.10	410.52	OK
Lantai 6	Interior	C-3	565.40	172.40	206.88	OK
	Eksterior	A-3	342.20	342.10	410.52	OK

Lantai 5	Interior	C-3	592.70	180.10	216.12	OK
	Eksterior	A-3	342.20	358.40	430.08	OK
Lantai 4	Interior	C-3	618.30	180.10	216.12	OK
	Eksterior	A-3	378.60	358.40	430.08	OK
Lantai 3	Interior	C-3	642.10	180.10	216.12	OK
	Eksterior	A-3	392.40	358.40	430.08	OK
Lantai 2	Interior	C-3	665.20	185.60	222.72	OK
	Eksterior	A-3	405.10	365.20	438.24	OK
Lantai 1	Interior	C-3	684.50	185.60	222.72	OK
	Eksterior	A-3	412.30	365.20	438.24	OK

BAB VIII

PERENCANAAN PONDASI

8.1. Umum

Perencanaan struktur bawah pada proyek tugas akhir Gedung Apartemen Az-Zahr ini menggunakan sistem pondasi tiang pancang beton bertulang. Demi menjamin keselamatan penghuni, keandalan komponen struktur bawah harus direncanakan secara matang agar ketika struktur menerima beban ekstrem, kegagalan elemen bawah tidak terjadi mendahului struktur atas (*strong column-weak beam concept* pada substruktur). Pemilihan jenis tiang pancang ini didasarkan pada kondisi geoteknis Kota Padang yang didominasi oleh lapisan tanah lunak. Selain kesesuaian daya dukung, tipe pondasi ini dipilih karena efisiensi proses pemasangannya yang relatif lebih mudah serta tidak rentan terhadap kendala cuaca di lapangan.

8.2. Daya Dukung Tiang Pancang

Daya dukung tiang pancang mencerminkan kapasitas atau kemampuan tiang dalam memikul beban kerja struktur. Analisis ini esensial untuk menetapkan nilai beban izin P_{ijin} tiang guna memastikan bahwa beban maksimum (P_{max}) yang terjadi tidak melampaui kapasitas ultimitnya. Kapasitas tersebut dipengaruhi oleh kekuatan material tiang itu sendiri serta karakteristik tanah di sekitarnya. Evaluasi kekuatan material pondasi mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019 dengan mempertimbangkan faktor reduksi bahan dan faktor tekuk. Dari hasil analisis kekuatan material dan daya dukung tanah, nilai terkecil (minimum) diambil sebagai acuan utama untuk menentukan konfigurasi dan jumlah kebutuhan tiang dalam satu *pile cap*. Pada perencanaan Gedung Apartemen Az-Zahr, estimasi daya dukung tanah dihitung berdasarkan parameter interpretasi hasil penyelidikan tanah lapangan berupa data sondir (CPT) dan SPT di Kota Padang.

8.3. Perencanaan Pondasi Tiang Pancang

Perencanaan pondasi tiang pancang tipe satu akan diencanakan menerima gaya aksial (N_u) terbesar. Perencanaan pondasi meliputi perhitungan daya dukung tiang pancang, periksa P_{ijin} tiang dan periksa gaya maksimum yang diterima oleh kelompok tiang.

8.3.1. Daya Dukung Tiang Pondasi Tipe Satu Berdasarkan Kekuatan Material

Daya dukung pondasi tiang akan dianalisa berdasarkan kekuatan bahan yang digunakan untuk tiang pancang, material beton dipilih sebagai bahan untuk tiang pancang. Tiang pancang untuk pondasi tipe satu yang akan direncanakan untuk gedung Apartemen Az zahr menggunakan produk dari PT. Wika Beton yang memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Tipe = *Prestressed Concrete Square Piles*

Mutu beton (f_c') = 42 MPa

Dimensi Tiang = 500 x 500 mm

Kelas = C

Luas Penampang = $2500 \text{ cm}^2 = 250000 \text{ mm}^2$

Berat Tiang = 625 Kg/m

Momen Retak = 17,21 Ton.m

Momen Ultimit = 24,91 Ton.m

Kuat Beban (P_{Tiang}) = 328.38 Ton.m

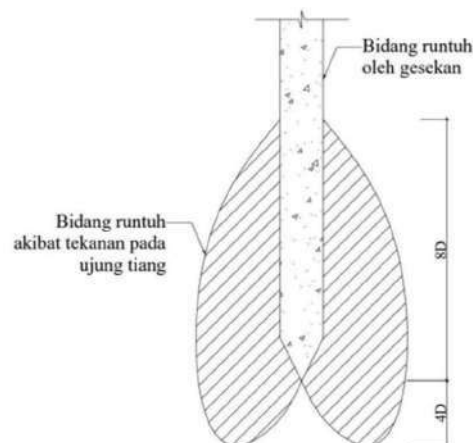
Panjang Tiang Pancang = 28 meter

Periksa kekuatan tiang berdasarkan kekuatan bahan :

$$\begin{aligned} \text{Kekuatan beban tiang } (P_{\text{bahan}}) &= 0,7 \times A \times f_c' \\ &= 0,7 \times 250000 \times 42 = 7350000 \text{ N} = 749,54 \text{ ton} \end{aligned}$$

8.3.2. Daya Dukung Tiang Pondasi Berdasarkan Kekuatan Tanah

Perhitungan daya dukung tanah berdasarkan kekuatan tanah yang dihitung berdasarkan data hasil tes sondir (CPT), dengan mempertimbangkan luas tanah jika terjadi keruntuhan akibat geser penetrasi konus atau tiang pancang seperti pada Gambar 8.1 sebagai berikut:



Gambar 8. 1 Ujung Tian Pancang Yang Mengalami Keruntuha Geser

8.3.3. Berdasarkan Data Sondir (CPT)

Daya dukung pada pondasi tiang dihitung dengan nilai konus dari hasil penyelidikan sondir pada kedalaman tertentu sampai ditemukan tanah keras. Data hasil penyelidikan sondir dapat dilihat pada Tabel 8.2.

Tabel 8. 1 Data Penyelidik Sondir

Depth (m)	C	LF	C+LF	ΣTF	Keterangan
(m)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
-19.00	85.0	0.47	85.5	451.5	C4D
-20.00	114.0	0.47	114.5	492.9	
-21.00	150.0	0.67	150.7	540.9	C8D
-22.00	140.0	0.67	140.7	638.2	
-23.00	141.0	0.60	141.6	650.2	
-24.00	159.0	0.73	159.7	752.9	
-25.00	110.0	0.67	110.7	796.9	

Keterangan :

C = Nilai *Conus*

TF = Total *Friction*

LF = *Local Friction*

JHP = Jumlah Hambatan Pelakat

f_s = *Side Friction* (hambatan lekat)

f = *Friction* (lekat)

Akibat Tahanan Ujung

Saat menentukan harga konus yang digunakan saat perencanaan, tidak diambil melalui harga konus diujung tiang. Akan tetapi dengan mengambil harga rata-rata sepanjang daerah keruntuhan dengan perumusan dibawah ini:

$$\sum C_n = \frac{C \times 8D + C \times 4D}{2}$$

Dimana:

C = diameter tiang pancang

C8D = nilai rata – rata konus, dihitung dari ujung tiang sampai $8D = 8 \times 50 = 400$ cm ke atas.

C4D = nilai rata – rata konus, dihitung dari ujung tiang sampai 4D = 4 x 50 = 200 cm ke bawah. 24

Sehingga data sondir yang ada, didapat harga – harga konus sebagai berikut:

Perhitungan C1 sepanjang 8D :

$$C1 = \frac{150+140+141+159+110}{5} = 140 \text{ kg/cm}^2$$

Perhitungan C2 sepanjang 4D :

$$C2 = \frac{85+11}{5} = 99,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Maka, } \Sigma Cn = \frac{(C \times 8D + C \times 4D)}{2} = \frac{(140 + 99,5)}{2} = 119,75 \text{ kg/cm}^2$$

Berdasarkan Data Penyelidikan Tanah Sondir (CPT)

Hasil penyelidikan sondir (CPT) didapat nilai jumlah hambatan pelekat (JHP) dan *conus*(Cn). Perhitungan daya dukung tanah berdasarkan pada jumlah hambatan pelekat (JHP) dan *conus* diambil pada kedalam 28 meter, dengan data sebagai berikut:

$$JHP = 769,9 \text{ kg/cm}^2$$

$$Cn = 119,75 \text{ kg/cm}^2$$

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah tersebut, maka daya dukung tiang dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$P_{\text{tiang}} = Cn \times \frac{A}{n1} + JHP \times \frac{K}{n2}$$

$$P_{\text{tiang 1 tiang}} = 119,75 \times \frac{2500}{3} + 769,9 \times \frac{(4 \times 50)}{5} = 130587,6 \text{ kg} = 130,59 \text{ ton}$$

Dimana:

P_{tiang} = Daya dukung tanah untuk satu tiang (kg)

A = Luas penampang tiang pancang (cm^2)

K = Keliling tiang pancang (cm)

Cn = Tekanan konus, akibat keruntuhan (kg/cm^2)

ΣCn = Tekanan konus rata – rata, akibat reruntuhan (kg/cm^2)

JHP = Jumlah hambatan pelekat (kg/cm)

n1 = Angka keamanan, 3

n2 = Angka keamanan, 5

Berat Tiang Pancang

$$\text{Berat sendiri tiang} = 625 \text{ kg/m} \times 25 \text{ m} = 15625 \text{ kg} = 15,63 \text{ ton.m}$$

Berat ijin netto yang diperkenankan pada tiang tersebut

$$P_{\text{ijin netto}} = 130,59 - 15,63 = 114,96 \text{ ton} < P_{\text{bahan}} = 749,54 \text{ ton (Ok)}$$

15

Diperoleh daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan kekuatan bahan beton lebih besar dibandingkan dengan daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan kekuatan tanah, maka kekuatan ijin tiang digunakan daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan kekuatan tanah.

15

Daya Dukung Tiang Berdasarkan Data Penyelidikan SPT

13

Menentukan daya dukung tanah berdasarkan hasil penyelidikan tanah SPT (*Standart Penetration Test*) menggunakan rumusan sebagai berikut:

Koreksi N – SPT

N – SPT perlu dikoreksi jika nilai N – SPT > 15. Rencana kedalaman pondasi tiang pancang adalah 28 meter, maka N – SPT perlu dikoreksi karena N – SPT pada kedalaman tanah 25 meter yaitu 27,5. Koreksi yang dianjurkan oleh Terzhagi dan Peck (1948) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} N_1 &= 15 + \frac{1}{2}(N' - 15) \\ &= 15 + \frac{1}{2}(27,5 - 15) \\ &= 21,25 \end{aligned}$$

Daya Dukung 1 Tiang

$$\begin{aligned} P_{\text{tiang}} &= 40 \times N_i \times \frac{A}{N} \\ &= 40 \times 21,25 \times \frac{2500}{3} = 708333 = 708,33 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$P_{\text{ijin netto}} = 708,33 - 17,5 = 690,83 \text{ ton} < P_{\text{bahan}} = 749,54 \text{ ton}$$

3

Dari perhitungan di atas daya dukung tiang hasil CPT dan SPT, nilai daya dukung 1 tiang pancang diambil yang terkecil dari dua perhitungan tersebut. Maka, diambil berdasarkan data CPT dengan P ijin 1 tiang = 114,96 ton.

3

8.3.4. Kebutuhan Tiang Pancang Pada Pondasi

Kebutuhan tiang pancang dalam satu kolom dapat diketahui dengan membagi beban aksial dari kolom dengan daya dukung ijin satu tiang. Hasil dari perhitungan tiang pancang sementara dapat dilihat pada **Tabel 7.2**. Contoh perhitungan:

$$\frac{\text{Beban Aksial Kolom (Nu)}}{P_{\text{ijin 1 Tiang}}} = \frac{776.57}{114,96} = 6,80 \text{ direncanakan } 9$$

Tabel 8. 2 Rencana Jumlah Tiang

Tiang	Beban (P)	P1 Tiang	Jumlah Tiang	
	(Ton)	(Ton)	Hitung	Rencana
	(a)	(b)	(a)/(b)	
KOLOM A1	332.05	114.96	2.89	4
KOLOM A2	489.31	114.97	4.26	9
KOLOM A3	520.64	114.98	4.53	9
KOLOM A4	525.99	114.99	4.57	9
KOLOM A5	524.14	114.1	4.59	9
KOLOM A6	524.16	114.101	4.59	9
KOLOM A7	525.93	114.102	4.61	9
KOLOM A8	520.65	114.103	4.56	9
KOLOM A9	489.28	114.104	4.29	9
KOLOM A10	331.98	114.105	2.91	4
KOLOM B1	371.55	114.106	3.26	4
KOLOM B2	634.67	114.107	5.56	9
KOLOM B3	760.87	114.108	6.67	9
KOLOM B4	778.56	114.109	6.82	9
KOLOM B5	776.74	114.11	6.81	9
KOLOM B6	777.14	114.111	6.81	9
KOLOM B7	778.50	114.112	6.82	9
KOLOM B8	760.84	114.113	6.67	9
KOLOM B9	634.30	114.114	5.56	9
KOLOM B10	371.80	114.115	3.26	4
KOLOM C1	269.31	114.116	2.36	4
KOLOM C2	559.77	114.117	4.91	9
KOLOM C3	751.56	114.118	6.59	9
KOLOM C4	777.91	114.119	6.82	9
KOLOM C5	778.54	114.12	6.82	9
KOLOM C6	778.48	114.121	6.82	9

KOLOM C7	777.91	114.122	6.82	9
KOLOM C8	751.50	114.123	6.59	9
KOLOM C9	560.25	114.124	4.91	9
KOLOM C10	269.41	114.125	2.36	4
KOLOM D1	105.84	114.126	0.93	4
KOLOM D2	446.05	114.127	3.91	4
KOLOM D3	547.20	114.128	4.79	9
KOLOM D4	554.53	114.129	4.86	9
KOLOM D5	555.17	114.13	4.86	9
KOLOM D6	555.17	114.131	4.86	9
KOLOM D7	554.53	114.132	4.86	9
KOLOM D8	547.21	114.133	4.79	9
KOLOM D9	445.91	114.134	3.91	4
KOLOM D10	105.63	114.135	0.93	4
KOLOM E1	74.75	114.136	0.65	4
KOLOM E2	140.03	114.137	1.23	4
KOLOM E3	117.72	114.138	1.03	4
KOLOM E4	87.28	114.139	0.76	4
KOLOM E5	86.61	114.14	0.76	4
KOLOM E6	86.61	114.141	0.76	4
KOLOM E7	87.28	114.142	0.76	4
KOLOM E8	117.72	114.143	1.03	4
KOLOM E9	140.05	114.144	1.23	4
KOLOM E10	74.76	114.145	0.65	4
KOLOM F1	105.84	114.146	0.93	4
KOLOM F2	446.05	114.147	3.91	4
KOLOM F3	547.20	114.148	4.79	9
KOLOM F4	554.53	114.149	4.86	9
KOLOM F5	555.15	114.15	4.86	9
KOLOM F6	555.15	114.151	4.86	9
KOLOM F7	554.53	114.152	4.86	9
KOLOM F8	547.20	114.153	4.79	9

KOLOM F9	446.00	114.154	3.91	4
KOLOM F10	105.76	114.155	0.93	4
KOLOM G1	269.31	114.156	2.36	4
KOLOM G2	559.77	114.157	4.90	9
KOLOM G3	751.56	114.158	6.58	9
KOLOM G4	777.90	114.159	6.81	9
KOLOM G5	778.67	114.16	6.82	9
KOLOM G6	778.67	114.161	6.82	9
KOLOM G7	777.90	114.162	6.81	9
KOLOM G8	751.52	114.163	6.58	9
KOLOM G9	559.40	114.164	4.90	9
KOLOM G10	269.59	114.165	2.36	4
KOLOM H1	371.54	114.166	3.25	4
KOLOM H2	634.67	114.167	5.56	9
KOLOM H3	760.86	114.168	6.66	9
KOLOM H4	778.62	114.169	6.82	9
KOLOM H5	776.57	114.17	6.80	9
KOLOM H6	776.57	114.171	6.80	9
KOLOM H7	778.63	114.172	6.82	9
KOLOM H8	760.80	114.173	6.66	9
KOLOM H9	635.14	114.174	5.56	9
KOLOM H10	371.62	114.175	3.25	4
KOLOM I1	332.05	114.176	2.91	4
KOLOM I2	489.32	114.177	4.29	9
KOLOM I3	520.63	114.178	4.56	9
KOLOM I4	526.09	114.179	4.61	9
KOLOM I5	524.18	114.18	4.59	9
KOLOM I6	524.18	114.181	4.59	9
KOLOM I7	526.08	114.182	4.61	9
KOLOM I8	520.64	114.183	4.56	9
KOLOM I9	489.19	114.184	4.28	9
KOLOM I10	331.88	114.185	2.91	4

Jarak Tiang Pancang

Jarak tiang pancang direncanakan sesuai dengan yang diijinkan, dihitung dengan persyaratan sebagai berikut:

Jarak Antar Tiang

$$2,5D \leq S \leq 3D$$

$$2,5 \times 50 \leq S \leq 3 \times 50$$

$$125 \leq S \leq 150$$

Digunakan jarak antar tiang, $S = 130$ cm

Jarak As Ke Tepi *Pile Cap*

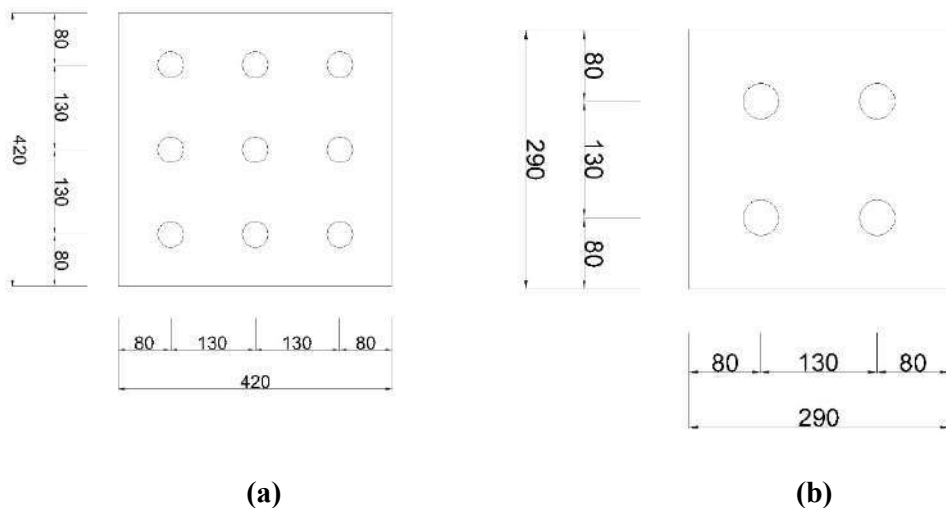
$$1,5D \leq S \leq 2D$$

$$1,5 \times 50 \leq S \leq 2 \times 50$$

$$75 \leq S \leq 100$$

Digunakan jarak antar tiang bagian tepi, $S = 80$ cm

Berdasarkan jumlah tiang pancang maka diperoleh ukuran *pile cap* sehingga terdapat 2 tipe pondasi, yaitu pada Gambar 8.2



Gambar 8. 2 Pondasi

8.3.5. Perhitungan Efisiensi Kelompok Tiang Pancang

Tiang pancang yang bekerja dalam kelompok kekuatannya akan terkoreksi sehingga tidak akan sebesar tiang pancang yang bekerja sendiri. Perlu dilakukan *control efisiensi* yang dihitung dengan rumusan:

$$\text{Efisiensi } (E_g) = 1 - \text{arc x tg } D/S \frac{m(n-1)+n(m-1)}{90mn}$$

Contoh perhitungan nilai efisiensi pada pondasi titik B4, dimana :

Jumlah baris tiang (m) = 3 baris

Jumlah kolom tiang (n) = 3 kolom

Maka, nilai efisiensi tiang kelompok pada titik B4 adalah :

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi (E}_g\text{)} &= 1 - \arcsin \frac{D}{S} \frac{m(n-1)+n(m-1)}{90mn} \\ &= 1 - 21,03 \frac{3(3-1)+3(3-1)}{90 \times 3 \times 3} \\ &= 1 \end{aligned}$$

Sehingga besar daya dukung tiang kelompok adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{ijin grup}} &= P_{\text{ijin tiang bersih}} \times E_g \\ &= 114.185 \times 1 \\ &= 114.185 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma P_{\text{ijin grup}} &= 114.185 \times 9 \\ &= 1027,67 \text{ ton} \end{aligned}$$

Tabel 8. 3 Konntrol Efisiensi Untuk Daya Dukung Pondasi

Titik Tiang	Konfigurasi Tiang		Jarak Tiang	Beban (P)	ΣP ijin grup	Kontrol
	m	n	(m)	(Ton)	(Ton)	(b) > (a)
				(a)	(b)	
KOLOM A1	2	2	1.3	332.05	1027.67	OK
KOLOM A2	3	3	1.3	489.31	1027.67	OK
KOLOM A3	3	3	1.3	520.64	1027.67	OK
KOLOM A4	3	3	1.3	525.99	1027.67	OK
KOLOM A5	3	3	1.3	524.14	1027.67	OK
KOLOM A6	3	3	1.3	524.16	1027.67	OK
KOLOM A7	3	3	1.3	525.93	1027.67	OK
KOLOM A8	3	3	1.3	520.65	1027.67	OK
KOLOM A9	3	3	1.3	489.28	1027.67	OK
KOLOM A10	2	2	1.3	331.98	1027.67	OK
KOLOM B1	2	2	1.3	371.55	1027.67	OK
KOLOM B2	3	3	1.3	634.67	1027.67	OK
KOLOM B3	3	3	1.3	760.87	1027.67	OK
KOLOM B4	3	3	1.3	778.56	1027.67	OK
KOLOM B5	3	3	1.3	776.74	1027.67	OK
KOLOM B6	3	3	1.3	777.14	1027.67	OK
KOLOM B7	3	3	1.3	778.50	1027.67	OK
KOLOM B8	3	3	1.3	760.84	1027.67	OK
KOLOM B9	3	3	1.3	634.30	1027.67	OK
KOLOM B10	2	2	1.3	371.80	1027.67	OK

KOLOM C1	2	2	1.3	269.31	1027.67	OK
KOLOM C2	3	3	1.3	559.77	1027.67	OK
KOLOM C3	3	3	1.3	751.56	1027.67	OK
KOLOM C4	3	3	1.3	777.91	1027.67	OK
KOLOM C5	3	3	1.3	778.54	1027.67	OK
KOLOM C6	3	3	1.3	778.48	1027.67	OK
KOLOM C7	3	3	1.3	777.91	1027.67	OK
KOLOM C8	3	3	1.3	751.50	1027.67	OK
KOLOM C9	3	3	1.3	560.25	1027.67	OK
KOLOM C10	2	2	1.3	269.41	1027.67	OK
KOLOM D1	2	2	1.3	105.84	1027.67	OK
KOLOM D2	2	2	1.3	446.05	1027.67	OK
KOLOM D3	3	3	1.3	547.20	1027.67	OK
KOLOM D4	3	3	1.3	554.53	1027.67	OK
KOLOM D5	3	3	1.3	555.17	1027.67	OK
KOLOM D6	3	3	1.3	555.17	1027.67	OK
KOLOM D7	3	3	1.3	554.53	1027.67	OK
KOLOM D8	3	3	1.3	547.21	1027.67	OK
KOLOM D9	2	2	1.3	445.91	1027.67	OK
KOLOM D10	2	2	1.3	105.63	1027.67	OK
KOLOM E1	2	2	1.3	74.75	1027.67	OK
KOLOM E2	2	2	1.3	140.03	1027.67	OK
KOLOM E3	2	2	1.3	117.72	1027.67	OK
KOLOM E4	2	2	1.3	87.28	1027.67	OK
KOLOM E5	2	2	1.3	86.61	1027.67	OK
KOLOM E6	2	2	1.3	86.61	1027.67	OK
KOLOM E7	2	2	1.3	87.28	1027.67	OK
KOLOM E8	2	2	1.3	117.72	1027.67	OK
KOLOM E9	2	2	1.3	140.05	1027.67	OK
KOLOM E10	2	2	1.3	74.76	1027.67	OK
KOLOM F1	2	2	1.3	105.84	1027.67	OK
KOLOM F2	2	2	1.3	446.05	1027.67	OK
KOLOM F3	3	3	1.3	547.20	1027.67	OK
KOLOM F4	3	3	1.3	554.53	1027.67	OK
KOLOM F5	3	3	1.3	555.15	1027.67	OK
KOLOM F6	3	3	1.3	555.15	1027.67	OK
KOLOM F7	3	3	1.3	554.53	1027.67	OK
KOLOM F8	3	3	1.3	547.20	1027.67	OK
KOLOM F9	2	2	1.3	446.00	1027.67	OK
KOLOM F10	2	2	1.3	105.76	1027.67	OK
KOLOM G1	2	2	1.3	269.31	1027.67	OK
KOLOM G2	3	3	1.3	559.77	1027.67	OK

KOLOM G3	3	3	1.3	751.56	1027.67	OK
KOLOM G4	3	3	1.3	777.90	1027.67	OK
KOLOM G5	3	3	1.3	778.67	1027.67	OK
KOLOM G6	3	3	1.3	778.67	1027.67	OK
KOLOM G7	3	3	1.3	777.90	1027.67	OK
KOLOM G8	3	3	1.3	751.52	1027.67	OK
KOLOM G9	3	3	1.3	559.40	1027.67	OK
KOLOM G10	2	2	1.3	269.59	1027.67	OK
KOLOM H1	2	2	1.3	371.54	1027.67	OK
KOLOM H2	3	3	1.3	634.67	1027.67	OK
KOLOM H3	3	3	1.3	760.86	1027.67	OK
KOLOM H4	3	3	1.3	778.62	1027.67	OK
KOLOM H5	3	3	1.3	776.57	1027.67	OK
KOLOM H6	3	3	1.3	776.57	1027.67	OK
KOLOM H7	3	3	1.3	778.63	1027.67	OK
KOLOM H8	3	3	1.3	760.80	1027.67	OK
KOLOM H9	3	3	1.3	635.14	1027.67	OK
KOLOM H10	2	2	1.3	371.62	1027.67	OK
KOLOM I1	2	2	1.3	332.05	1027.67	OK
KOLOM I2	3	3	1.3	489.32	1027.67	OK
KOLOM I3	3	3	1.3	520.63	1027.67	OK
KOLOM I4	3	3	1.3	526.09	1027.67	OK
KOLOM I5	3	3	1.3	524.18	1027.67	OK
KOLOM I6	3	3	1.3	524.18	1027.67	OK
KOLOM I7	3	3	1.3	526.08	1027.67	OK
KOLOM I8	3	3	1.3	520.64	1027.67	OK
KOLOM I9	3	3	1.3	489.19	1027.67	OK
KOLOM I10	2	2	1.3	331.88	1027.67	OK

8.3.6. Kontrol Beban Maksimum 1 Tiang Pancang

Perhitungan jumlah tiang pancang sebelumnya masih berdasarkan beban aksial yang bekerja pada tiang. Oleh sebab itu perlu adanya perhitungan kontrol P_{maks} 1 tiang pada kelompok tiang akibat momen yang bekerja pada tiang tersebut.

Pondasi tiang pancang dengan dimensi 400 mm dengan konfigurasi tiang pancang 9 buah menghasilkan $P_{ijin\ grup}$ sebesar 535,50 ton. Nilai P_{maks} harus lebih kecil dari $P_{ijin\ grup}$ tiang pondasi. Sebagai contoh perhitungan adalah titik perencanaan nomor G5 sebagai berikut:

$$N_u = 778,67 \text{ ton.m}$$

$$M_{ux} = 9,1878 \text{ ton.m}$$

$$M_{uy} = 9,1731 \text{ ton.m}$$

Dengan menggunakan konfigurasi 3 x 3 tiang pancang seperti pada Gambar 8.2. , dengan menggunakan dimensi tiang 500 x 500 mm dan jarak antar tiang pancang sebesar 1,30 meter maka dilakukan P_{maks} yaitu :

$$P_{maks} = \frac{\Sigma P}{n} \pm \frac{M_x \cdot Y}{\Sigma Y^2} \pm \frac{M_y \cdot X}{\Sigma X^2} < \eta \times P_{ijin}$$

Dimana:

P_p = Beban maksimum yang diterima satu tiang

ΣP = Jumlah total yang bekerja pada tiang

n = Jumlah tiang dalam kelompok tiang

M_x = Momen yang terjadi pada bidang tegak lurus sumbu X

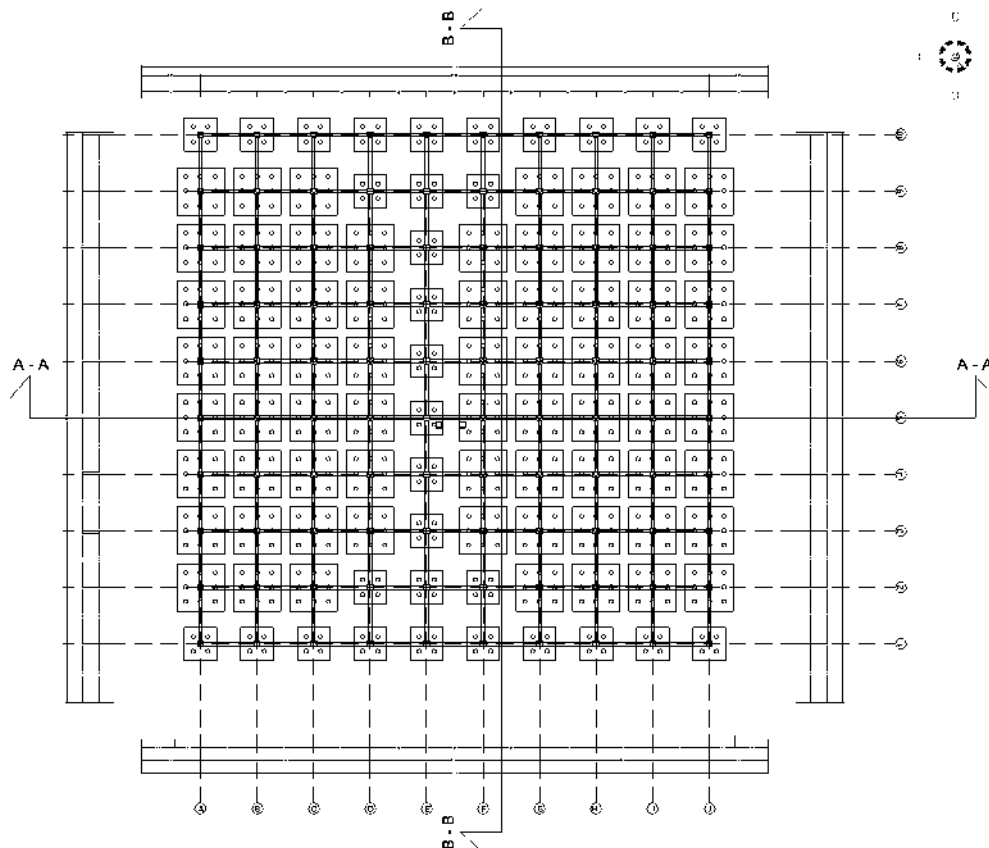
M_y = Momen yang terjadi pada bidang tegak lurus sumbu Y

X_{maks} = Ordinat terjauh terhadap titik berat kelompok tiang arah X

Y_{maks} = Ordinat terjauh terhadap titik berat kelompok tiang arah Y

ΣX^2 = Jumlah kuadrat X

ΣY^2 = Jumlah kuadrat Y



Gambar 8.3 Denah Pondasi

Berdasarkan gambar 8.3 dapat dihitung :

$$\begin{aligned}
X \text{ maks} &= 1,30 \text{ m} \\
Y \text{ maks} &= 0,65 \text{ m} \\
\Sigma X^2 &= (9 \times 1,30)^2 = 6,76 \text{ m}^2 \\
\Sigma Y^2 &= (9 \times 0,65)^2 = 1,69 \text{ m}^2 \\
\frac{M_x \cdot Y}{\Sigma Y^2} &= 1,507 \\
\frac{M_y \cdot X}{\Sigma X^2} &= 0,268
\end{aligned}$$

Pada 1 tiang pancang kelompok, beban yang bekerja berdasarkan jarak pancang ke sumbu netral:

$$\begin{aligned}
P1 &= \frac{778,67}{9} + \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} + \frac{9,1731 \times 1,30}{6,76} = 91,82 \text{ ton} \\
P2 &= \frac{778,67}{9} + \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} - \frac{9,1731 \times 0}{6,76} = 90,05 \text{ ton} \\
P3 &= \frac{778,67}{9} + \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} - \frac{9,1731 \times 1,30}{6,76} = 88,29 \text{ ton} \\
P4 &= \frac{778,67}{9} - \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} + \frac{9,1731 \times 1,30}{6,76} = 84,75 \text{ ton} \\
P5 &= \frac{778,67}{9} - \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} - \frac{9,1731 \times 0}{6,76} = 82,99 \text{ ton} \\
P6 &= \frac{778,67}{9} - \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} - \frac{9,1731 \times 1,30}{6,76} = 81,22 \text{ ton} \\
P7 &= \frac{778,67}{9} + \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} + \frac{9,1731 \times 1,30}{6,76} = 91,82 \text{ ton} \\
P8 &= \frac{778,67}{9} + \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} - \frac{9,1731 \times 0}{6,76} = 90,05 \text{ ton} \\
P9 &= \frac{778,67}{9} + \frac{9,1878 \times 0,65}{1,69} - \frac{9,1731 \times 1,30}{6,76} = 88,29 \text{ ton}
\end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan di atas :

$$P_{maks} = P1 = 91,82 \text{ ton} < P_{ijin \text{ Grup}} = 114,185 \text{ ton}$$

8.3.7. Penurunan (settlement) Pondasi Tiang Pancang

Penurunan pondasi tiang tunggal dipengaruhi oleh mekanisme pengalihan beban, oleh karena itu perhitungannya harus bersifat pendekatan dengan menggunakan metode empiris. Dalam perhitungan penurunan (*Settlement*) pondasi tiang diambil salah satu tiang dengan gaya aksial terbesar, perhitungan ini menggunakan metode Vesic (1977) sebagai berikut:

Penurunan Tiang Tunggal

$$s = \frac{D}{100} + \frac{Q \times L}{A_p \times E_p}$$

Dimana:

S = Penurunan pondasi tiang Tunggal

D = Dimensi tiang

Q = Total beban yang bekerja

L = Panjang tiang

A_p = Luas penampang tiang

E_p = Modulus elastisitas

Diketahui:

$$P = 778,67 \text{ ton}$$

$$D = 0,50 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} A_p &= D^2 \\ &= 0,40^2 \\ &= 0,16 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$L = 25 \text{ meter}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat tiang} &= A_p \times \gamma \text{ beton bertulang} \times L \\ &= 0,25 \times 2,4 \text{ ton/m}^3 \times 25 \\ &= 15 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= P + \text{Berat tiang} \\ &= 778,67 + 15 \\ &= 793,67 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_p &= 4700\sqrt{f'c'} \\ &= 4700\sqrt{42} \\ &= 30459,48 \text{ N/mm}^2 \\ &= 3106002,55 \text{ ton/m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga penurunan pondasi tiang Tunggal (s) sebesar :

$$\begin{aligned} s &= \frac{D}{100} + \frac{Q \times L}{A_p \times E_p} \\ &= \frac{0,50}{100} + \frac{793,67 \times 25}{0,25 \times 3106002,55} \\ &= 0,031 \text{ m} \end{aligned}$$

Penurunan Tiang Kelompok

$$S_g = s \times \sqrt{\frac{B_g}{D}}$$

Dimana:

S_g = Penurunan pondasi kelompok tiang

s = Penurunan pondasi tiang Tunggal

B_g = Lebar kelompok tiang

D = Dimensi tiang

Dketahui:

s = 0,031

B_g = 1,3 m

$$S_g = 0,031 \times \sqrt{\frac{1,3}{0,50}}$$

$$= 0,050 \text{ m}$$

Penurunan Yang Di Ijinkan

Syarat perbandingan penurunan yang aman untuk penurunan izin pada kelompok tiang adalah sebagai berikut :

$$S_{ijin} = \frac{L}{250} = \frac{25}{250} = 0,100 \text{ m}$$

$$\text{Maka, } S_{ijin} = 0,100 \geq S_g = 0,050 \text{ m} \quad (\text{Ok})$$

8.4. Perencanaan *Pile Cap*

Pile cap berfungsi untuk menerima beban dari kolom yang kemudian disebarkan ke tiang pancang perencanaan *pile cap* direncanakan dengan spesifikasi berikut:

Mutu beton (f_c') = 35 MPa

Mutu tulangan = 420 MPa

Lebar (b) = 4200 mm

Panjang (h) = 4200 mm

Tebal (t) = 1000 mm

Dimensi kolom = 50 x 50 cm

Dimensi tiang pancang = 500 mm x 500 mm

Diameter tulangan = D 22 mm

Tebal selimut (t_s) = 75 mm (SNI 2847:2019, Tabel 20.6.1.3.1)

Rasio sisi panjang dan sisi pendek kolom

$$\beta = \frac{500}{500} = 1$$

Tinggi efektif arah X :

$$dx = t - ts - 0,5D$$

$$= 1000 - 75 - 0,5 (22) = 914 \text{ mm}$$

Tinggi efektif arah Y :

$$dy = t - ts - D - 0,5D$$

$$= 1000 - 75 - 22 - 0,5 (22) = 892 \text{ mm}$$

8.4.1. Kontrol Tebal Pile Cap

Kontrol ketebalan *pile cap* digunakan cara *trial and error*. Sebagai contoh perhitungan adalah titik perencanaan nomor B4, sebagai berikut :

$$\text{Beban aksial (P)} = 778,67 \text{ ton} = 778670 \text{ kg}$$

$$\text{Mutu beton} = 35 \text{ MPa} = 356,902 \text{ kg}$$

Maka,

$$\sigma_{pons} = 0,65\sqrt{\sigma_{bk}} = 0,65\sqrt{356,902} = 12,28 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{pons} \geq \frac{1,5P}{(2x((b \times h)h) + 2x((b \times h)h))}$$

$$12,28 \geq \frac{1,5 \times 778670}{(2 \times ((50 \times h)h) + 2 \times ((50 \times h)h))}$$

Dicoba tebal *pile cap*, $h = 100 \text{ cm}$

$$12,28 \geq \frac{1,5 \times 778670}{(2 \times ((50 \times 100)100) + 2 \times ((50 \times 100)100))}$$

$$12,28 \geq 0,58$$

(Ok)

Jadi ketebalan *pile cap* digunakan 100 cm

8.4.2. Kontrol Geser Pondasi

Perencanaan tebal *pile cap* harus memenuhi ketentuan bahwa kekuatan geser nominal harus lebih besar dari geser ponds yang terjadi. Penampang kritis terletak pada daerah di bawah kolom, keliling penampang kritis dihitung sebagai berikut :

$$bo = 2(b + dx) + 2(h + dx)$$

$$= 2(500 + 914) + 2(500 + 914) = 5656 \text{ mm}$$

Berdasarkan SNI 2847:2019, Tabel 22.6.5.2 untuk komponen dua arah non prategang, V_c diambil nilai terkecil dari persamaan berikut :

$$\text{a.) } V_c = 0,33\lambda\sqrt{f'c'} \times bo \times dx$$

$$= 0,33\lambda\sqrt{35} \times 5656 \times 914$$

$$= 10092612,56 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b.) } V_c &= 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \lambda \sqrt{f'c'} \times b_o \times dx \\
 &= 0,17 \left(1 + \frac{2}{1} \right) \times 1 \sqrt{35} \times 5656 \times 914 \\
 &= 15597672,41 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c.) } V_c &= 0,083 \left(\frac{a_s \times dx}{b_o} + 2 \right) \lambda \sqrt{f'c'} \times b_o \times dx \\
 a_s &= 50 \text{ (kolom dalam)} \\
 &= 0,083 \left(\frac{50 \times 914}{5656} + 2 \right) \lambda \sqrt{35} \times 5656 \times 914 \\
 &= 255873074 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Maka, diambil persamaan terkecil untuk V_n , yaitu; $V_c = 10092611,56 \text{ N} = 1009,261156 \text{ ton}$

(a)

Besar beban kolom yang digunakan adalah beban terbesar yang terjadi pada perencanaan, titik yang memiliki beban terbesar adalah titik G5 yaitu 352,38 ton

Periksa Geser

Maka, untuk $\Sigma P_{u\text{tiang}}$ adalah:

Berat pada tiang pancang sendiri	= 15,63 ton
Beban aksial pada kolom	= 778,67 ton
Beban sendiri <i>pile cap</i>	= 20,184 ton +
$\Sigma P_{u\text{tiang}}$	= 814,48 ton

$$\phi V_c \geq \Sigma P_{u\text{tiang}}$$

$$0,75 \times 10092612,56 \geq 814,48$$

$$756,96 \geq 390,06 \quad \textbf{(Ok)}$$

8.4.3. Penulangan Pile Cap

Syarat batas tulangan SNI 2847:2019, Tabel 24.4.3.2 menyatakan bahwa rasio tulangan minimum pelat dua arah non prategang dengan $f_y < 420 \text{ MPa}$ ditentukan sebagai berikut :

$$\rho_{\min} = 0,0020$$

Sedangkan untuk rasio maksimum dihitung berdasarkan persamaan berikut :

$$\rho_{\max} = 0,75 \times \frac{0,85 \times \beta_1 \times f_c}{f_y} \times \left(\frac{600}{600 + f} \right)$$

Dengan nilai β_1 untuk $28 \text{ MPa} < f_c' < 55 \text{ MPa}$ berdasarkan SNI 2847:2019, Tabel 22.2.2.4.3 dihitung sebagai berikut

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05(f_c' - 28)}{7}$$

$$= 0,85 - \frac{0,05(35-2)}{7}$$

$$= 0,8$$

$$\rho_{maks} = 0,75 \times \frac{0,85 \times 0,8 \times 35}{420} \times \left(\frac{600}{600+420} \right)$$

$$= 0,025$$

Penulangan Arah X

Momen yang terjadi

$$q_u = h \times t \times \gamma_{beton}$$

$$= 4,2 \times 1 \times 2,4$$

$$= 10,08 \text{ ton/m}^3$$

$$P_{maks} = 93,39 \text{ ton}$$

$$M_u = -(P_{maks} \times 1,2) + \left(\frac{1}{2} q_u \times L \right)$$

$$= -(93,39 \times 1,2) + \left(\frac{1}{2} 6,96 \times 1,45 \right)$$

$$= -117,117 \text{ ton.m (Arah momen berlawanan jarum jam)}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi}$$

$$= \frac{117,11}{0,8}$$

$$= 146,39 \text{ Nmm}$$

Rasio tulangan perlu

$$m = \frac{f_y}{0,85 f_{cr}}$$

$$= \frac{420}{0,85 \times 35}$$

$$= 14,11$$

$$R_n = \frac{M_n}{h \times d y^2}$$

$$= \frac{146,39 \times 10^2}{2900 \times 892}$$

$$= 0,63 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \times m \times R_n}{f_y} \right)} \right)$$

$$= \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \times 14,11 \times 0,63}{420} \right)} \right)$$

$$= 0,0015$$

Kontrol rasio tulangan

$$\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$$

$$0,0020 \leq 0,0015 \leq 0,025$$

$$\text{Maka, } \rho_{\min} = 0,0020$$

Tulangan perlu

$$A_{s\text{perlu}} = \rho \times h \times d = 0,002 \times 2900 \times 914 = 5301,2 \text{ mm}^2$$

Tulangan pakai

Direncanakan tulangan tarik D22 - 200

$$\begin{aligned} A_{s\text{pakai}} &= \frac{h}{s} \times \frac{1}{4} \pi d^2 \\ &= \frac{2900}{200} \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\ &= 5509,13 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Maka, } A_{s\text{perlu}} = 5301,2 \text{ mm}^2 \leq A_{s\text{pakai}} = 5509,13 \text{ mm}^2$$

Penulangan Arah Y

Momen yang terjadi

$$\begin{aligned} q_u &= h \times t \times \gamma_{\text{beton}} \\ &= 2,9 \times 1 \times 2,4 \\ &= 6,96 \text{ ton/m}^3 \end{aligned}$$

$$P_{\max} = 91,82 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned} M_u &= - (P_{\max} \times 0,6) + \left(\frac{1}{2} q_u \times L \right) \\ &= - (91,82 \times 0,6) + \left(\frac{1}{2} \times 6,96 \times 2,1 \right) \\ &= - 62,4 \text{ ton.m (Arah momen berlawanan jarum jam)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_n &= \frac{M_u}{\phi} \\ &= \frac{62,4}{0,8} \\ &= 78 \text{ T.M} \end{aligned}$$

Rasio tulangan perlu

$$\begin{aligned} m &= \frac{f_y}{0,85 f_c'} \\ &= \frac{420}{0,85 \times 35} \\ &= 14,11 \end{aligned}$$

$$R_n = \frac{M_n}{h \times d^2}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{78 \times 10^2}{4200 \times 892} \\
&= 0,021 \text{ N/mm}^2 \\
\rho &= \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \times m \times R_n}{f_y} \right)} \right) \\
&= \frac{1}{14,11} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 \times 14,11 \times 0,021}{420} \right)} \right) \\
&= 0,00079
\end{aligned}$$

Kontrol rasio tulangan

$$\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$$

$$0,0020 \leq 0,00079 \leq 0,025$$

Maka, $\rho_{\min} = 0,0020$

Tulangan perlu

$$A_{s\text{perlu}} = \rho \times h \times d = 0,002 \times 4200 \times 892 = 7492,8 \text{ mm}^2$$

Tulangan pakai

Direncanakan tulangan tarik D22 - 200

$$\begin{aligned}
A_{s\text{pakai}} &= \frac{h}{s} \times \frac{1}{4} \pi d^2 \\
&= \frac{4200}{200} \times \frac{1}{4} \times 3,14 \times 22^2 \\
&= 7978,74 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

$$\text{Maka, } A_{s\text{perlu}} = 7492,8 \text{ mm}^2 \leq A_{s\text{pakai}} = 7978,74 \text{ mm}^2$$

8.5. Perencanaan Sloof

Sloof adalah struktur di atas pondasi yang berfungsi menyalurkan beban dan menopang dinding agar tidak runtuh akibat pergerakan tanah. Karena berperan penting dalam kekuatan bangunan, sloof harus memiliki dimensi yang memadai. Umumnya, perhitungan dilakukan pada sloof dengan bentang terpanjang sebagai perwakilan. Data perencanaan sloof sebagai berikut:

$$\text{Mutu Beton } (f'_c) = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Mutu Baja } (f_y) = 420 \text{ MPa}$$

$$\text{Panjang (L)} = 5000 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang Bersih (Ln)} = 4500 \text{ mm}$$

$$\text{Tinggi (h)} = 600 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar (b)} = 300 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
\text{Tulangan Utama} &= D 22 \\
\text{Tulangan Sengkang} &= \emptyset 10 \\
\text{Tebal Selimut}(ts) &= 75 \text{ mm (SNI 2847:2019, Tabel 20.6.1.3.1)} \\
\text{Pu kolom} &= 2844311,55 \text{ N} = 2884,312 \text{ kN} \\
\text{Tinggi Efektif:} \\
d &= h - ts - D_{\text{geser}} - 0,5D_{\text{lentur}} \\
&= 600 - 75 - 10 - 0,5 (22) \\
&= 504 \text{ mm}
\end{aligned}$$

8.5.1. Analisa Gaya Dalam

Beban yang ditimpakan ke sloof meliputi berat sendiri sloof beban mati tambahan di atas sloof jika ada, dan beban aksial tekan atau tarik yang berasal dari 10% beban aksial kolom

Gaya Aksial Sloof

$$\begin{aligned}
\text{Pu} &= 10\% \times \text{Pu}_{\text{kolom}} \\
&= 10\% \times 2884,312 \text{ kN} \\
&= 288,431 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Beban Mati Sloof

$$\begin{aligned}
\text{Berat sendiri} &= 0,3 \times 0,6 \times 23,535 = 4,23 \text{ kN} \\
\text{Berat batu bata} &= 4,5 \times 3,4 \times 2,451 = 37,51 \text{ kN} + \\
qD &= 41,74 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Beban Ultimit

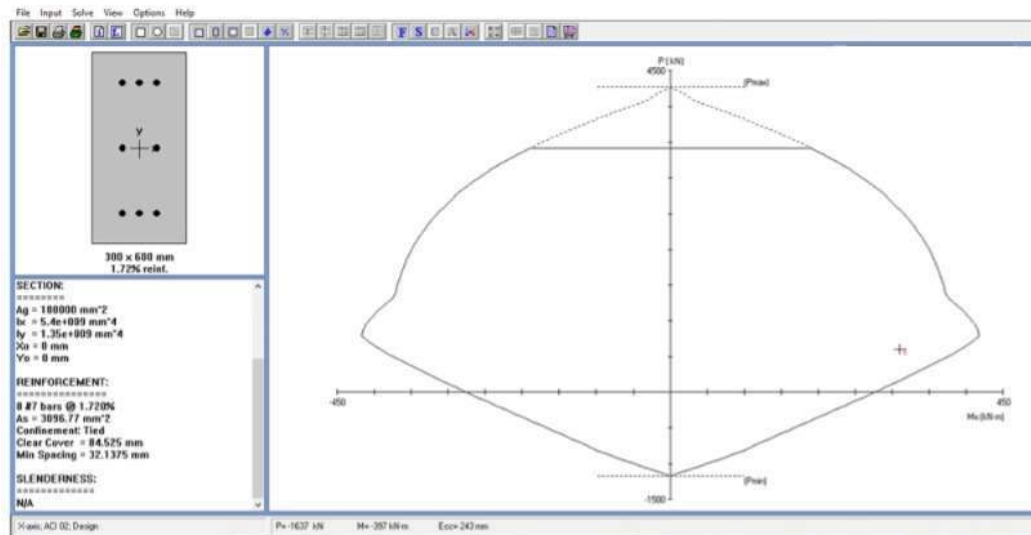
$$\begin{aligned}
qU &= 1,4D \\
&= 1,4(41,74) \\
&= 58,44 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Momen Sloof

$$\begin{aligned}
\text{Mu} &= \frac{1}{8} \times q_u \times l^2 \\
&= \frac{1}{8} \times 58,44 \times 5^2 \\
&= 182,64 \text{ kN}
\end{aligned}$$

8.5.2. Tulangan Longitudinal

SNI 2847:2019, Pasal 18.7.4.1 menyatakan bahwa luas tulangan longitudinal tidak boleh kurang dari $0,01 A_g$ dan tidak lebih dari $0,06 A_g$. Untuk mendapatkan konfigurasi tulangan, digunakan program spColumn, seperti Gambar 8. 4.



Gambar 8. 4 Diagram Interaksi Mn-Pn (*Output spColumn*)

8.5.3. Tulangan Geser

Sloof memiliki perilaku seperti kolom maka untuk menghitung kekuatan gesernya harus sesuai dengan persyaratan SNI 2847:2019, pasal 22.5.6.1 dengan dibebani tekan aksial.

$$\begin{aligned}
 V_c &= 0,17\lambda\sqrt{f_c'} \times \left(1 + \frac{N_u}{14A_g}\right) b_w \times d \\
 &= 0,17 \times 1 \times \sqrt{35} \times \left(1 + \frac{2884312}{14 \times 300 \times 600}\right) 300 \times 504 \\
 &= 335841,94 \text{ N} = 335,84 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tulangan Geser yang Diperlukan

$$\begin{aligned}
 V_u &= 1/2 \times q_u \times l \\
 &= 1/2 \times 58,44 \times 5 \\
 &= 146,11 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$V_u < \phi V_c$$

$$146,11 < 0,75 \times 335,84$$

$$146,11 < 251,88 \text{ kN}$$

Dikarenakan penampang tidak perlu tambahan tulangan geser, maka dipasang tulangan geser praktis. Berdasarkan SNI 2847:2019, Pasal 18.13.3.2 spasi tulangan geser untuk sloof tidak boleh melebihi 0,5 dimensi penampang atau 300 mm, maka :

$$S_{\min} = h/2 = 600/2 = 300 \text{ mm}$$

Maka, direncanakan menggunakan tulangan geser $\phi 10 - 300\text{mm}$.

BAB IX

KESIMPULAN DAN SARAN

9.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang di dapat pada Tugas Akhir Perencanaan Gedung Apartemen Az-zahr di Kota Padang menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yaitu:

1. Implementasi metodologi *Building Information Modeling (BIM)* melalui platform pemodelan parametrik *Autodesk Revit* yang diintegrasikan dengan perangkat lunak *Robot Structural Analysis Professional (RSAP)* terbukti mampu mengoptimalkan akurasi koordinasi antar-elemen struktural secara signifikan. Fitur *bi-directional synchronization* menciptakan ekosistem perencanaan yang bersifat *closed-loop*, di mana orientasi geometris, properti material (f_c 35 MPa), dan model analitis saling tersinkronisasi dalam satu basis data tunggal (*Single Source of Truth*). Alur kerja digital berbasis objek ini berhasil mengeliminasi fragmentasi informasi serta risiko duplikasi dokumen yang umum dijumpai pada alur kerja CAD 2D konvensional. Melalui integrasi ini, setiap modifikasi dimensi elemen akibat perubahan kapasitas struktur dapat langsung terartikulasikan secara otomatis pada model fisik, sehingga meminimalisasi potensi ketidakcocokan data (*clash*) dan risiko *human error* dalam manajemen revisi desain.
2. Integrasi pemodelan analitis pada tingkat kedalaman *Level of Development (LOD)* 300 berhasil memfasilitasi analisis beban lateral gempa secara dinamis dan presisi pada bangunan bertingkat 10 lantai dengan elevasi 40 meter di wilayah seismisitas tinggi Kota Padang. Melalui pengujian penetrasi tanah (SPT) dan sondir (CPT), lokasi tinjauan ditetapkan ke dalam klasifikasi Tanah Lunak (Situs SE). Berdasarkan simulasi gaya lateral gabungan dari 18 kombinasi pembebanan yang merujuk pada SNI 1726:2019 dan SNI 1727:2020, dimensi penampang awal (*preliminary design*) berupa kolom utama 50×50 cm dan balok induk 30×60 cm dinyatakan memenuhi syarat kapasitas penampang dan rigiditas global struktur. Evaluasi kinerja struktur terhadap simpangan antar lantai (*inter-story drift*) menunjukkan status aman di seluruh tingkat, di mana nilai simpangan maksimum pasca-amplifikasi faktor $C_d = 5,5$ berada pada rentang yang terkendali dan tidak melampaui batas izin aman = 80 mm. Selain itu, kriteria daktilitas

penuh berupa *Strong Column-Weak Beam* (SCWB) terpenuhi secara mutlak dengan total kapasitas momen kolom $\sum M_{nc} = 893$ kNm yang melampaui batas minimum 1,2 kali kapasitas momen balok $\sum M_{nb} = 396$ kNm, sehingga menjamin mekanisme sendi plastis terbentuk secara terencana pada elemen balok

3. Penerapan metodologi BIM efektif dalam memfasilitasi pemodelan dan visualisasi tiga dimensi pada komponen hubungan balok-kolom (HBK) SRPMK. **Meskipun pengecekan dan evaluasi parameter detailing penulangan daktail (seperti dimensi pengekanan, panjang angkur, dan jarak sengkang) dilakukan secara manual,** integrasi model parametrik Revit sangat membantu dalam menginspeksi ruang kritis secara visual. Proses ini mampu memastikan ketepatan konfigurasi tulangan serta mencegah *spatial clash* di lapangan. Hasil akhir berupa model digital dan dokumentasi teknis ini dinyatakan sepenuhnya patuh (*compliant*) terhadap standar SNI 2847:2019.

9.2.Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan studi komparasi mengenai efisiensi interoperabilitas antara *Autodesk Revit* dengan perangkat lunak analisis struktural yang berbeda (seperti ETABS atau SAP2000). Hal ini penting untuk mengevaluasi konsistensi transfer parameter analitis daktilitas SRPMK dan mendeteksi potensi reduksi data objek (*loss of data*) antar-platform yang berbeda.
2. Untuk lebih meningkatkan efisiensi pada tahap lokalisasi detail gambar kerja (*shop drawing*), penelitian berikutnya dapat mengintegrasikan pemrograman visual seperti *Dynamo* atau *Revit API Scripting*. Langkah ini direkomendasikan untuk mengotomatisasi pemodelan tulangan longitudinal dan transversal sengkang pengekan secara langsung berdasarkan data *table Output* analisis struktur, sehingga meminimalisasi proses penulangan manual satu per satu di dalam platform BIM.
3. Disarankan bagi peneliti selanjutnya untuk menerapkan alur kerja (*workflow*) BIM yang sama untuk membandingkan efisiensi proses perancangan antara Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan sistem penahan gaya lateral lainnya, seperti Sistem Ganda (*Dual System*) atau Dinding Geser (*Shear Wall*), pada s1si seismik ekstrem yang setara di Kota Padang

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Khan, M. A., & Zhang, L. (2024). Integration of geotechnical data within BIM environments for enhanced seismic hazard mitigation. *Automation in Construction*, 158, 105210.
- AIA Contract Documents. (2022). *E202-2022: Building Information Modeling Protocol Exhibit*. The American Institute of Architects.
- Alhamidi, F., & Hori, M. (2023). Nonlinear static pushover analysis for reinforced concrete frames: Method and applications. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 37(1), 04022089.
- Ansor, M., & Widodo, A. (2024). Review and validation of RSAP software for concrete structural analysis under seismic loads. *Journal of Civil Engineering Innovation*, 15(2), 89–104.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2021). *Peta Parameter Seismik Eksplisit untuk Wilayah Pantai Barat Sumatera*. BMKG.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019a). *SNI 1726:2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019b). *SNI 2847:2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: BSN.
- BIM Forum. (2023). *Level of Development (LOD) Specification Part I & II*. BIMForum.
- Chen, W. F., & Scawthorn, C. (Eds.). (2024). *Earthquake Engineering Handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Elnashai, A. S., & Di Sarno, L. (2025). *Fundamentals of Earthquake Engineering: From Source to Structure* (2nd ed.). Wiley.
- Fardis, M. N. (2024). *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings: Based on EN-Eurocode 8*. Springer.
- Johnson, P., & Tan, L. (2022). Common pitfalls in 2D CAD documentation for multi-disciplinary design. *Journal of Architectural Engineering and Technology*, 8(3), 201–212.

- Kim, J. H., & Lee, S. H. (2022). Interface parameterization and connection detailing in advanced construction documentation using BIM. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101485.
- Li, X., Li, Y., & Ding, L. (2024). The evolution of Building Information Modeling: From 3D geometry to integrated construction databases. *Automation in Construction*, 160, 105302.
- Martínez, A., Pérez, B., & García, C. (2023). Parametric BIM framework for sustainable design evaluation. *Sustainability*, 15(7), 4123.
- Moehle, J. P. (2023). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. McGraw-Hill Education.
- Oktavianus, G., Siregar, T., & Widodo, A. (2024a). Automated BIM framework integrating IFC and Python scripting for reinforced concrete slab design. *Construction and Building Materials*, 321, 126789.
- Oktavianus, G., Siregar, T., & Widodo, A. (2024b). Comparative study of revision workflows: BIM versus 2D CAD in high-rise office buildings. *Journal of Construction Innovation*, 12(1), 34–48.
- Prabowo, A., & Setiawan, B. (2021). Efektivitas braced frame dalam membatasi drift pada perencanaan struktur baja bertingkat. *Jurnal Teknik Sipil dan Infrastruktur*, 9(2), 45–56.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2023). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press.
- Putra, R. A., & Ramadhani, F. (2024). Analisis pushover non-linear elemen pengekang Hubungan Balok-Kolom (HBK) pada SRPMK daktail penuh. *Jurnal Rekayasa Struktur Indonesia*, 6(2), 112–126.
- Rahayu, S., & Santoso, H. (2023). Reduksi kesalahan penandaan dan kuantitas material menggunakan automated scheduling berbasis BIM. *Jurnal Infrastruktur dan Lingkungan Binaan*, 19(2), 75–88.
- Rahman, F., & Khatulistiani, D. (2024). Otomasi parameter input seismik makro berbasis shared parameters pada wilayah rawan gempa Kota Padang. *Jurnal Media Teknik Sipil*, 22(1), 14–27.
- Salsabila, N. (2023). *Rule-Based Checking untuk Validasi Detailing Penulangan SRPMK pada Platform BIM* [Skripsi]. Universitas Wijaya Kusuma Surabaya.

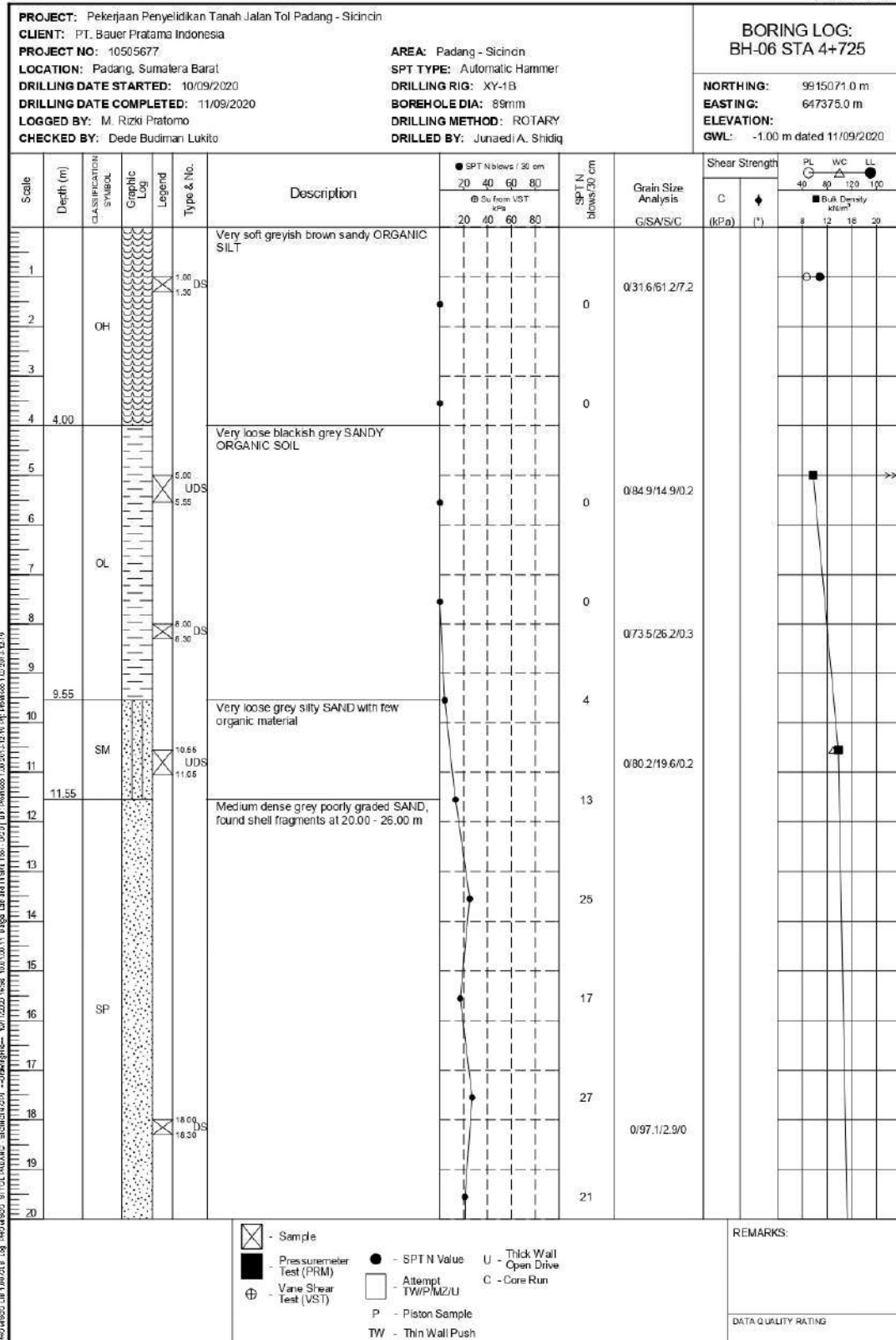
- Salsabila, N., & Arya, K. (2024). Workflow integration from Revit to RSAP via IFC for seismic analysis. *Automation in Construction Technology*, 8(1), 12–25.
- Santoso, E., & Chen, C. H. (2023). Comparative analysis of energy dissipation capacity between braced frames and SRPMK under cyclic loading. *International Journal of Civil Engineering*, 21(4), 541–553.
- Smith, P., & Lee, J. (2023). Accelerating multidisciplinary coordination through cloud-based BIM platforms. *Journal of Management in Engineering*, 39(2), 04023001.
- Taranath, B. S. (2022). *Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction*. CRC Press.
- Wicaksono, B., & Hartono, R. (2025). Integrasi alur kerja BIM-to-analysis untuk evaluasi inter-story drift pada struktur bangunan tahan gempa di Kota Padang. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, 7(1), 89–102.
- Wight, J. K. (2022). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design* (8th ed.). Pearson.
- Wijaya, M., & Pratama, R. (2022). Estimasi tekno-ekonomi awal bangunan gedung bertingkat menggunakan konsep parameter LOD 100. *Jurnal Manajemen Konstruksi*, 14(3), 202–215.
- Yan, F., Liu, J., & Smith, P. (2024). Design Revision Manager: Automating BIM revisions via Python and Revit API. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(1), 78–92.
- Zhang, Y., & Lu, W. (2022). Preliminary structural design automation using empirical rules in schematic BIM modeling. *Advanced Engineering Informatics*, 53, 101692.
- Zou, Y., Feng, Z., & Gao, W. (2023). Variational direct modeling: Integrating parametric and direct modeling in BIM. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101450.

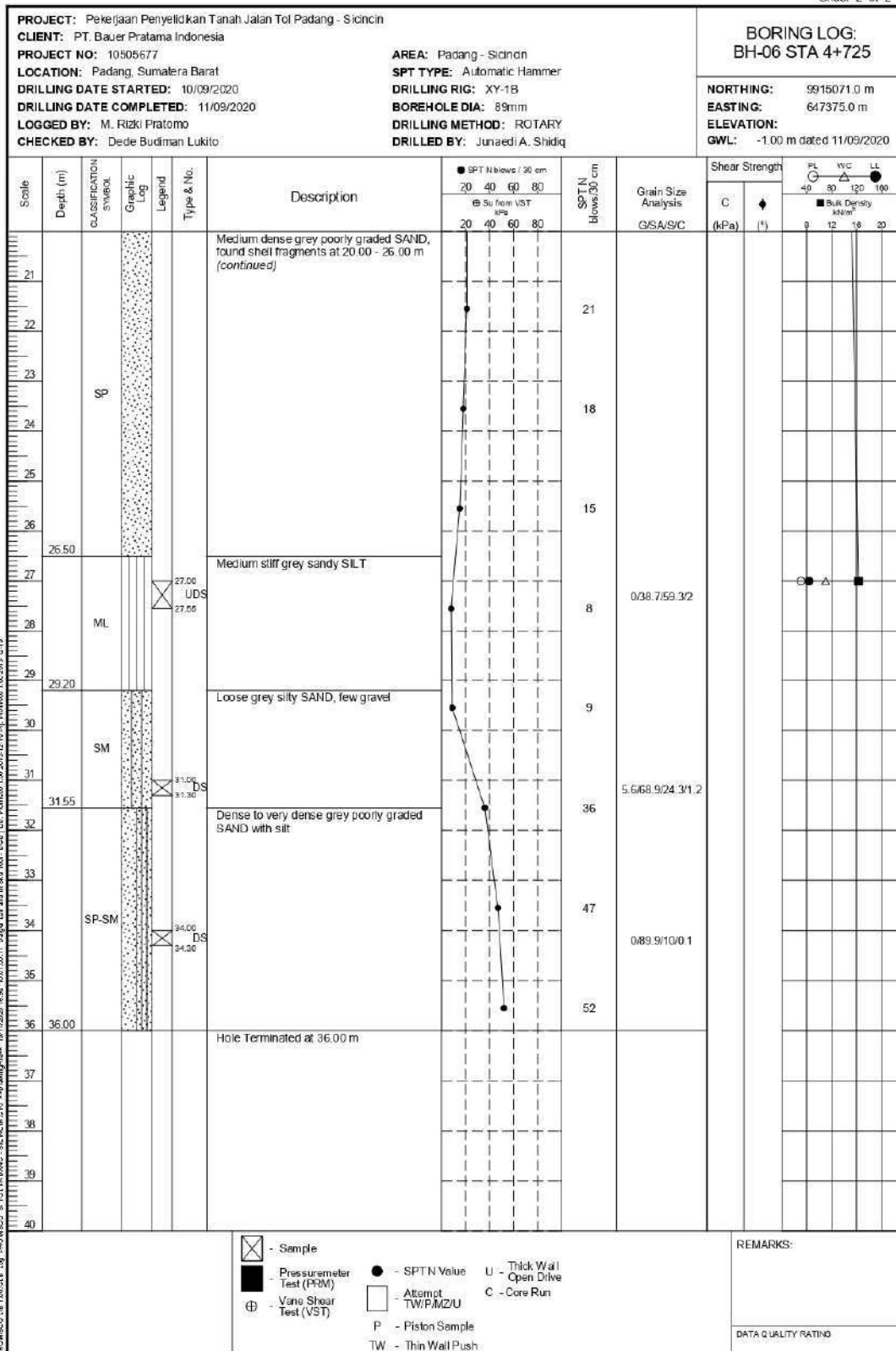
LAMPIRAN

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Borlog

Sheet 1 of 2





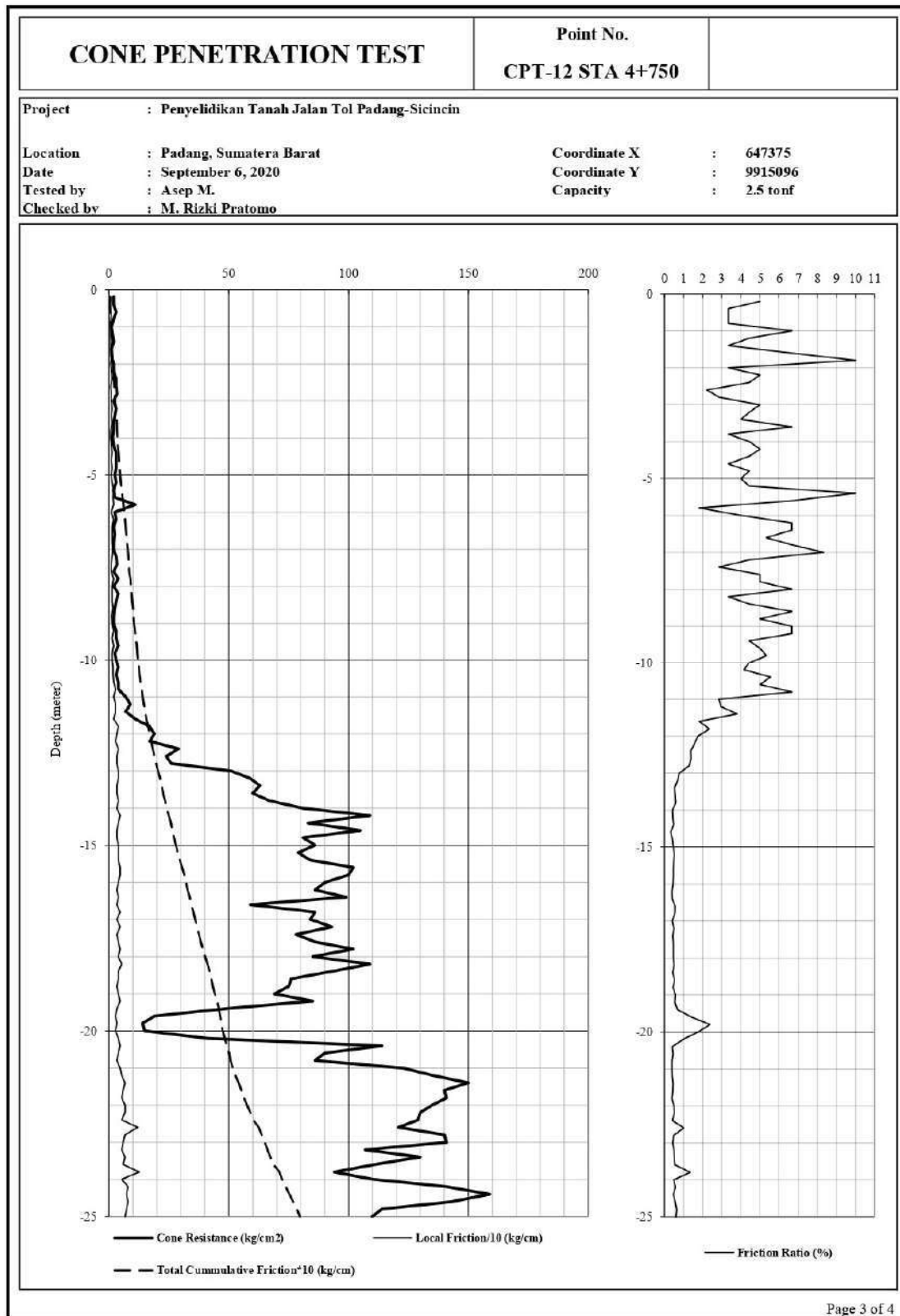
Lampiran 2. Data CPT

CONE PENETRATION TEST							
Project : Penyelidikan Tanah Jalan Tol Padang-Sicincin				Tested by : Asep M.			
Location : Padang, Sumatera Barat				Checked by : M. Rizki Pratomo			
Date : September 6, 2020				Coordinate X : 647375			
Point No. : CPT-12 SIA 4+750				Coordinate Y : 9915096			
Depth	Manometer Reading		Friction Resistance	Local Friction	Total Cumulative Friction	Friction Ratio	Remark
	Cone Resistance	Total Resistance					
meter	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm	%	
0.00	-	-	-	-	-	-	
-0.20	2.0	3.5	1.5	0.10	2.2	5.00	
-0.40	2.0	3.0	1.0	0.07	3.5	3.33	
-0.60	3.0	4.5	1.5	0.10	5.5	3.33	
-0.80	2.0	3.0	1.0	0.07	6.9	3.33	
-1.00	1.0	2.0	1.0	0.07	8.2	6.67	
-1.20	1.5	2.5	1.0	0.07	9.5	4.44	
-1.40	2.0	3.0	1.0	0.07	10.9	3.33	
-1.60	1.0	2.0	1.0	0.07	12.2	6.67	
-1.80	1.0	2.5	1.5	0.10	14.2	10.00	
-2.00	2.0	3.0	1.0	0.07	15.5	3.33	
-2.20	2.0	3.5	1.5	0.10	17.5	5.00	
-2.40	3.0	5.0	2.0	0.13	20.2	4.44	
-2.60	3.0	4.0	1.0	0.07	21.5	2.22	
-2.80	3.5	5.0	1.5	0.10	23.5	2.86	
-3.00	2.0	3.5	1.5	0.10	25.5	5.00	
-3.20	3.0	5.0	2.0	0.13	28.2	4.44	
-3.40	2.5	4.0	1.5	0.10	30.2	4.00	
-3.60	2.0	4.0	2.0	0.13	32.9	6.67	
-3.80	2.0	3.0	1.0	0.07	34.2	3.33	
-4.00	1.5	2.5	1.0	0.07	35.5	4.44	
-4.20	2.0	3.5	1.5	0.10	37.5	5.00	
-4.40	3.0	5.0	2.0	0.13	40.2	4.44	
-4.60	3.0	4.5	1.5	0.10	42.2	3.33	
-4.80	3.0	5.0	2.0	0.13	44.9	4.44	
-5.00	2.5	4.0	1.5	0.10	46.9	4.00	
-5.20	3.0	5.0	2.0	0.13	49.5	4.44	
-5.40	2.0	5.0	3.0	0.20	53.5	10.00	
-5.60	2.5	5.0	2.5	0.17	56.9	6.67	
-5.80	11.0	14.0	3.0	0.20	60.9	1.82	
-6.00	2.5	4.0	1.5	0.10	62.9	4.00	
-6.20	3.0	6.0	3.0	0.20	66.9	6.67	
-6.40	2.0	4.0	2.0	0.13	69.5	6.67	
-6.60	2.5	4.5	2.0	0.13	72.2	5.33	
-6.80	2.0	4.0	2.0	0.13	74.9	6.67	
-7.00	2.0	4.5	2.5	0.17	78.2	8.33	
-7.20	3.0	5.0	2.0	0.13	80.9	4.44	
-7.40	3.5	5.0	1.5	0.10	82.9	2.86	
-7.60	2.0	3.5	1.5	0.10	84.9	5.00	
-7.80	4.0	7.0	3.0	0.20	88.9	5.00	
-8.00	2.0	4.0	2.0	0.13	91.5	6.67	
-8.20	4.0	6.0	2.0	0.13	94.2	3.33	
-8.40	3.0	5.0	2.0	0.13	96.9	4.44	
-8.60	2.5	5.0	2.5	0.17	100.2	6.67	
-8.80	2.0	3.5	1.5	0.10	102.2	5.00	
-9.00	2.0	4.0	2.0	0.13	104.9	6.67	
-9.20	3.0	6.0	3.0	0.20	108.9	6.67	
-9.40	3.0	5.0	2.0	0.13	111.5	4.44	
-9.60	4.0	7.0	3.0	0.20	115.5	5.00	
-9.80	2.5	4.5	2.0	0.13	118.2	5.33	
-10.00	3.0	5.0	2.0	0.13	120.9	4.44	
-10.20	4.0	6.5	2.5	0.17	124.2	4.17	
-10.40	3.0	5.5	2.5	0.17	127.5	5.56	
-10.60	4.0	7.0	3.0	0.20	131.5	5.00	
-10.80	4.0	8.0	4.0	0.27	136.9	6.67	
-11.00	7.0	10.0	3.0	0.20	140.9	2.86	
-11.20	9.0	13.0	4.0	0.27	146.2	2.96	
-11.40	7.0	11.0	4.0	0.27	151.5	3.81	
-11.60	11.0	14.0	3.0	0.20	155.5	1.82	
-11.80	17.0	23.0	6.0	0.40	163.5	2.35	
-12.00	19.0	24.0	5.0	0.33	170.2	1.75	
-12.20	17.0	21.0	4.0	0.27	175.5	1.57	
-12.40	29.0	35.0	6.0	0.40	183.5	1.38	

CONE PENETRATION TEST

Project	: Penyelidikan Tanah Jalan Tol Padang-Sicincin	Tested by	: Asep M.
Location	: Padang, Sumatera Barat	Checked by	: M. Rizki Pratomo
Date	: September 6, 2020	Coordinate X	: 647375
Point No.	: CPT-12 STA 4+750	Coordinate Y	: 9915096

Depth	Manometer Reading		Friction Resistance	Local Friction	Total Cumulative Friction	Friction Ratio	Remark
	Cone Resistance	Total Resistance					
meter	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm	kg/cm	%	
-12.60	24.0	29.0	5.0	0.33	190.2	1.39	
-12.80	26.0	31.0	5.0	0.33	196.9	1.28	
-13.00	51.0	57.0	6.0	0.40	204.9	0.78	
-13.20	59.0	65.0	6.0	0.40	212.9	0.68	
-13.40	63.0	68.0	5.0	0.33	219.5	0.53	
-13.60	60.0	65.0	5.0	0.33	226.2	0.56	
-13.80	67.0	73.0	6.0	0.40	234.2	0.60	
-14.00	81.0	86.0	5.0	0.33	240.9	0.41	
-14.20	109.0	116.0	7.0	0.47	250.2	0.43	
-14.40	83.0	89.0	6.0	0.40	258.2	0.48	
-14.60	105.0	110.0	5.0	0.33	264.9	0.32	
-14.80	81.0	86.0	5.0	0.33	271.5	0.41	
-15.00	86.0	92.0	6.0	0.40	279.5	0.47	
-15.20	79.0	85.0	6.0	0.40	287.5	0.51	
-15.40	84.0	90.0	6.0	0.40	295.5	0.48	
-15.60	102.0	109.0	7.0	0.47	304.9	0.46	
-15.80	100.0	107.0	7.0	0.47	314.2	0.47	
-16.00	90.0	96.0	6.0	0.40	322.2	0.44	
-16.20	86.0	91.0	5.0	0.33	328.9	0.39	
-16.40	99.0	105.0	6.0	0.40	336.9	0.40	
-16.60	59.0	64.0	5.0	0.33	343.5	0.56	
-16.80	86.0	93.0	7.0	0.47	352.9	0.54	
-17.00	84.0	89.0	5.0	0.33	359.5	0.40	
-17.20	93.0	100.0	7.0	0.47	368.9	0.50	
-17.40	78.0	83.0	5.0	0.33	375.5	0.43	
-17.60	86.0	92.0	6.0	0.40	383.5	0.47	
-17.80	102.0	109.0	7.0	0.47	392.9	0.46	
-18.00	85.0	91.0	6.0	0.40	400.9	0.47	
-18.20	109.0	117.0	8.0	0.53	411.5	0.49	
-18.40	93.0	99.0	6.0	0.40	419.5	0.43	
-18.60	76.0	82.0	6.0	0.40	427.5	0.53	
-18.80	75.0	80.0	5.0	0.33	434.2	0.44	
-19.00	69.0	75.0	6.0	0.40	442.2	0.58	
-19.20	85.0	92.0	7.0	0.47	451.5	0.55	
-19.40	49.0	54.0	5.0	0.33	458.2	0.68	
-19.60	19.0	23.0	4.0	0.27	463.5	1.40	
-19.80	14.0	19.0	5.0	0.33	470.2	2.38	
-20.00	15.0	19.0	4.0	0.27	475.5	1.78	
-20.20	41.0	47.0	6.0	0.40	483.5	0.98	
-20.40	114.0	121.0	7.0	0.47	492.9	0.41	
-20.60	90.0	96.0	6.0	0.40	500.9	0.44	
-20.80	86.0	91.0	5.0	0.33	507.5	0.39	
-21.00	123.0	130.0	7.0	0.47	516.9	0.38	
-21.20	135.0	143.0	8.0	0.53	527.5	0.40	
-21.40	150.0	160.0	10.0	0.67	540.9	0.44	
-21.60	140.0	149.0	9.0	0.60	552.9	0.43	
-21.80	141.0	149.0	8.0	0.53	563.5	0.38	
-22.00	135.0	145.0	10.0	0.67	576.9	0.49	
-22.20	130.0	140.0	10.0	0.67	590.2	0.51	
-22.40	129.0	137.0	8.0	0.53	600.9	0.41	
-22.60	121.0	139.0	18.0	1.20	624.9	0.99	
-22.80	140.0	150.0	10.0	0.67	638.2	0.48	
-23.00	141.0	150.0	9.0	0.60	650.2	0.43	
-23.20	107.0	115.0	8.0	0.53	660.9	0.50	
-23.40	130.0	140.0	10.0	0.67	674.2	0.51	
-23.60	111.0	120.0	9.0	0.60	686.2	0.54	
-23.80	94.0	113.0	19.0	1.27	711.5	1.35	
-24.00	110.0	118.0	8.0	0.53	722.2	0.48	
-24.20	141.0	153.0	12.0	0.80	738.2	0.57	
-24.40	159.0	170.0	11.0	0.73	752.9	0.46	
-24.60	143.0	155.0	12.0	0.80	768.9	0.56	
-24.80	114.0	125.0	11.0	0.73	783.5	0.64	
-25.00	110.0	120.0	10.0	0.67	796.9	0.61	



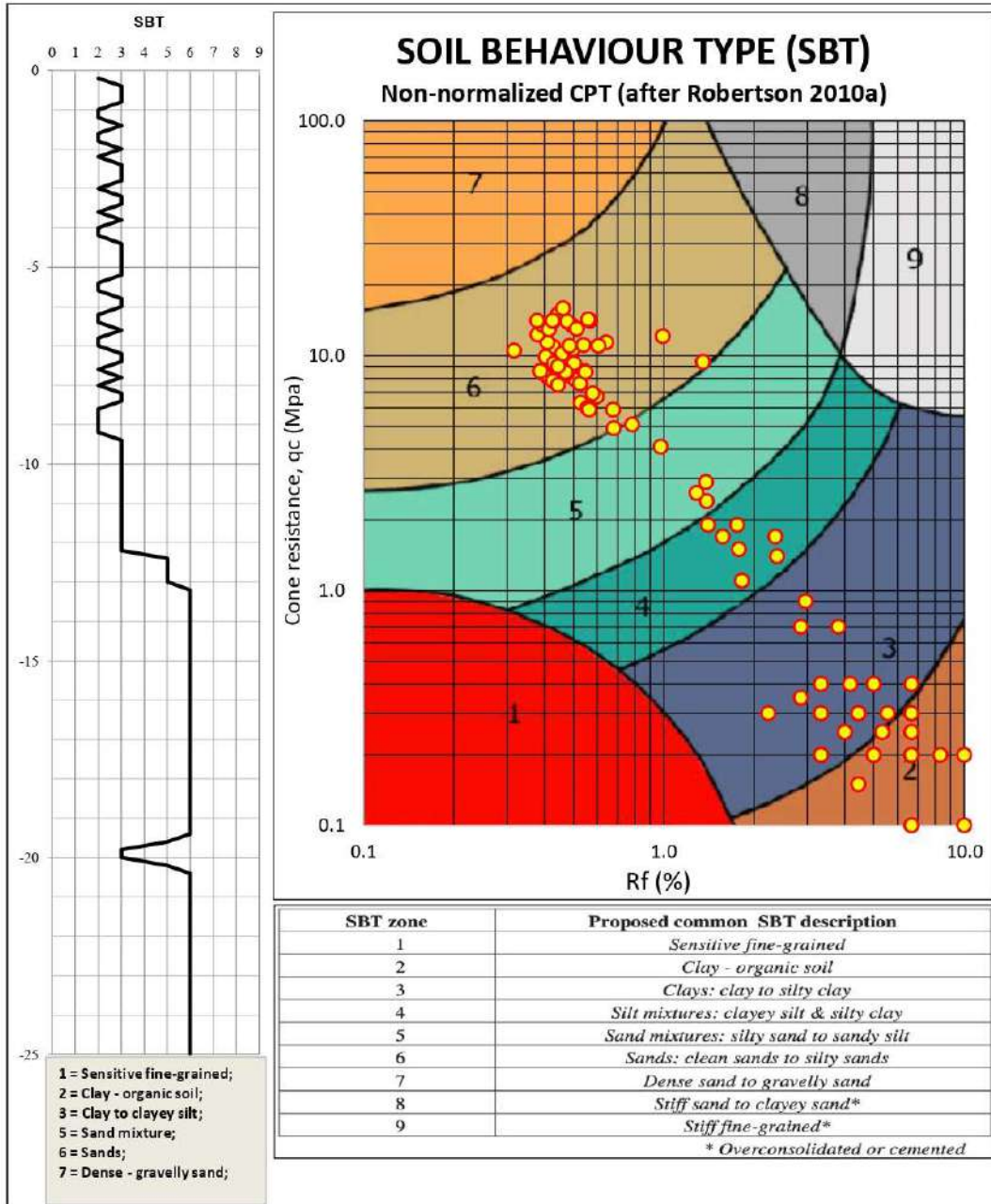
CONE PENETRATION TEST

Point No.
CPT-12 STA 4+750

Project : Penyelidikan Tanah Jalan Tol Padang-Sicincin

Location : Padang, Sumatera Barat
Date : September 6, 2020
Tested by : Asep M.
Checked by : M. Rizki Pratomo

Coordinate X : 647375
Coordinate Y : 9915096
Capacity : 2.5 tonf



BIODATA PENULIS



Alief Farhan Febrianto

Email : alieffarhanfebrianto@gmail.com

Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara, yang akrab disapa Alief, lahir di Surabaya pada tanggal 27 Februari 2004. Penulis menempuh pendidikan tinggi di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya (UWKS) sejak tahun 2022, setelah sebelumnya menyelesaikan pendidikan menengah di SMKN 2 Surabaya dengan jurusan Desain Pemodelan & Informasi Bangunan (DPIB). Selama masa perkuliahan, penulis menorehkan prestasi dengan terpilih sebagai salah satu mahasiswa yang berhasil lolos seleksi ketat program MSIB (Magang dan Studi Independen Bersertifikat) Kemendikbudristek Batch 7, menyisihkan ribuan pelamar dari berbagai perguruan tinggi secara nasional, untuk posisi *BIM Engineer: From Beginner to Advanced* di PT Solusi Utama Konsultan. Selain memperdalam keahlian digital tersebut, penulis juga aktif mengembangkan kompetensi lapangan dengan menjadi mahasiswa magang sebagai Asisten Pengawas Proyek dari CV Griya Persada *Engineering* pada pembangunan Gedung TBRO RSUD Bhakti Dharma Husada Surabaya (Juli–Oktober 2025). Di bidang organisasi, penulis turut mengemban amanah sebagai Wakil Bupati HMTS UWKS periode 2024–2025 dan Penanggung Jawab (PJ) FKMTSI Wilayah IX Jatim Sub-Wilayah Surabaya periode 2024–2026. Tugas Akhir ini merupakan wujud dedikasi penulis dalam rekayasa digital konstruksi yang dituangkan dalam judul "IMPLEMENTASI *BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)* SEBAGAI MEDIA PEMODELAN DAN INTEROPERABILITAS PERENCANAAN STRUKTUR BETON BERTULANG TAHAN GEMPA GEDUNG APARTEMEN 'AZ-ZAHR' DENGAN SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS (SRPMK) DI KOTA PADANG", dengan harapan dapat memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu teknik sipil di Indonesia.