

ANALISIS PERHITUNGAN STRUKTUR BUNKER AKSELERATOR ELEKTRON ENERGI TINGGI MENGGUNAKAN ETABS

Jethro Lukito Hutagalung¹, Pio Ranap Tua Naibaho², Kristina Sembiring³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tama Jagakarsa Jl. TB Simatupang No. 152 Jagakarsa Jakarta Selatan

Email: jethro.hutagalung002@gmail.com

Email: piorthnaibaho@gmail.com

Email: kristinasembiring70@gmail.com

ABSTRAK

Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sedang mengembangkan Gedung Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET) di Lebak Bulus, Jakarta Selatan, sebagai bagian dari upaya untuk mendukung penelitian dan inovasi ilmiah di Indonesia. Salah satu komponen utama dalam proyek ini adalah pembangunan Bunker yang dirancang untuk memiliki ketahanan tinggi terhadap radiasi dan gempa bumi, dengan mempertimbangkan wilayah Indonesia yang rawan gempa. Desain Bunker ini memperhitungkan percepatan gempa dasar (Peak Ground Acceleration atau PGA) sebesar 0,3g sesuai dengan kondisi geologis setempat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menghitung ulang struktur kolom dan pelat bunker AEET sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI). Metode penelitian yang digunakan meliputi studi literatur untuk memahami teori dan standar yang relevan, pengolahan data lapangan, pemodelan struktur menggunakan software ETABS, analisis gaya dalam, serta perhitungan manual menggunakan Excel untuk memverifikasi hasil pemodelan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur kolom dan pelat bunker AEET mampu menahan beban aksial, geser, dan momen yang terjadi selama operasional, serta memenuhi seluruh persyaratan keamanan dan ketahanan gempa sesuai standar SNI. Desain ulang yang dilakukan meningkatkan keamanan struktur dan memastikan operasional yang aman dan efisien dalam jangka panjang. Penelitian ini juga merekomendasikan penggunaan material modern dan penerapan sistem pemantauan struktural secara real-time untuk memastikan keberlanjutan dan keselamatan fasilitas ini di masa depan. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan infrastruktur penelitian di Indonesia, memastikan bahwa fasilitas AEET tidak hanya berteknologi canggih, tetapi juga aman dan tangguh dalam menghadapi kondisi geologi yang menantang.

Kata kunci: Bunker, Analisis Struktur, Akselerator.

1. PENDAHULUAN

Fasilitas ini memiliki peran strategis dalam mendukung penelitian dan inovasi di berbagai bidang ilmu pengetahuan dan teknologi, terutama dalam eksperimen fisika partikel. Pembangunan fasilitas gedung Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET) melibatkan berbagai aspek, termasuk pembangunan Bunker dan Hanggar sebagai struktur atapnya. Bunker merupakan bagian penting dari fasilitas ini karena berfungsi sebagai ruang perlindungan terhadap pancaran radiasi yang mungkin terjadi selama proses di dalamnya. Oleh karena itu, struktur bangunan Bunker harus dirancang dengan sangat cermat untuk memastikan keamanan dan ketahanannya terhadap gempa bumi. Sebelumnya, struktur bangunan Bunker telah dibangun oleh pihak Cina dan telah dirancang serta dianalisis oleh tim tenaga ahli struktur dari Cina dengan menggunakan percepatan gempa dasar (PGA) sebesar 0,1g. Namun, mengingat Indonesia merupakan daerah yang rentan terhadap gempa bumi dengan skala yang lebih besar, maka diperlukan penyesuaian dalam desain dan analisis struktur Bunker untuk menanggapi potensi gempa yang lebih kuat, dengan menggunakan percepatan gempa dasar (PGA) sebesar 0,3g. Dalam konteks ini, penelitian yang dilakukan bertujuan untuk melakukan analisis dan perhitungan ulang terhadap struktur Bunker Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET) dengan mempertimbangkan standar desain dan teknik konstruksi yang berlaku di Indonesia. Penelitian ini memiliki relevansi yang tinggi dalam memastikan keamanan dan ketahanan struktur bangunan terhadap gempa bumi yang mungkin terjadi di masa depan, serta sebagai kontribusi dalam pengembangan infrastruktur ilmiah di

Indonesia. Dengan demikian, pembaruan dan penyesuaian terhadap desain struktur Bunker akan menjadi langkah penting dalam memastikan keberlanjutan dan efektivitas dari fasilitas gedung Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET) sebagai pusat penelitian dan inovasi di Indonesia.

Struktur Kolom

kolom merupakan elemen struktur bangunan yang sangat penting, karena kolom harus menahan seluruh beban dan meneruskannya ke struktur fondasi. Selain harus mampu menerima seluruh beban, kolom juga harus mampu menahan beban torsi yang diakibatkan oleh perilaku beban itu sendiri. (Razvi & Shaikh, 2018)

Fungsi kolom adalah sebagai penerus beban seluruh bangunan ke pondasi. Bila diumpamakan, kolom itu seperti rangka tubuh manusia yang memastikan sebuah bangunan berdiri (Putri et al., 2021)

Menurut (Al-Rousan et al., 2021) menyatakan bahwa perilaku struktural dan integritas bangunan beton bertulang yang memikul beban siklik lateral secara dominan tergantung pada kinerja sambungan antara balok dan kolom. Daya dukung sambungan balok kolom dalam menahan beban lateral bergantung pada kekuatan komponennya yaitu balok, kolom, dan joint. Desain sambungan balok kolom dari rangka penahan momen memerlukan ketentuan khusus pada semua desain guna memastikan tingkat kerusakan yang terjadi.

Menurut (Allam et al., 2018) menyatakan bahwa sambungan antara balok dan kolom merupakan zona penting dalam struktur beton bertulang yang bertujuan untuk menahan momen. Perilaku sambungan tersebut sangat mempengaruhi kekuatan dan daktilitas struktur secara keseluruhan. Terdapat beberapa kemungkinan mode kegagalan yang dapat terjadi pada sambungan balok kolom. Mode tersebut meliputi kegagalan lentur kolom, kegagalan geser balok, kegagalan geser sendi, dan kegagalan ikatan tulangan.

Struktur Pelat

Pelat adalah elemen horizontal struktur yang mendukung beban mati maupun beban hidup dan menyalurkannya ke rangka vertikal dari sistem struktur. Fungsi utama pelat adalah sebagai diafragma atau unsur pengaku horizontal yang sangat bermanfaat untuk mendukung ketegaran balok portal pada bangunan Gedung. Pelat juga digunakan untuk mendapatkan bidang atau permukaan yang rata pada konstruksi beton. (Pratomo & Hudori, 2021)

Gaya Dalam

Gaya dalam adalah gaya yang membentuk keseimbangan dengan gaya luar. (Manalip et al., 2022)

Menurut (Sholeh, 2019) gaya dalam adalah gaya yang melawan gaya luar yang timbul dari kekuatan bahan konstruksi yang terdiri dari gaya normal, gaya geser, dan momen.

Beberapa jenis jenis gaya dalam ialah

- Gaya Normal
- Gaya Lintang
- Momen Lentur

Tinjauan Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai bangunan tahan gempa dan pemanfaatan perangkat lunak untuk analisis struktural sudah banyak dilakukan. Guci et al. (2021) menyoroti pentingnya analisis struktural yang akurat untuk bangunan tinggi agar tahan terhadap gempa. Penelitian lain oleh Siswanto (2018) menunjukkan bahwa dalam perencanaan bangunan tahan gempa, perlu dipertimbangkan faktor percepatan gempa dan pemilihan sistem rangka yang sesuai. Selain itu, Padole et al. (2021) menguji efektivitas perangkat lunak ETABS dalam pemodelan struktur bangunan untuk menilai stabilitasnya terhadap beban gempa. Meskipun berbagai penelitian ini telah memperkaya pemahaman tentang desain bangunan tahan gempa, fokusnya masih terbatas pada bangunan komersial atau perumahan. Struktur bunker akselerator yang membutuhkan ketahanan terhadap gempa sekaligus radiasi belum banyak dieksplorasi.

Perbedaan dan Kontribusi Penelitian

Penelitian ini memiliki perbedaan signifikan dari penelitian sebelumnya dengan fokus pada struktur khusus, yaitu bunker Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET) milik BRIN di Jakarta. Bunker ini dirancang untuk ketahanan ekstra terhadap gempa dan radiasi. Dalam menganalisis struktur bunker AEET, penelitian ini menggunakan parameter Peak Ground Acceleration (PGA) sebesar 0,3g, yang lebih tinggi dibandingkan standar di Cina yang hanya 0,1g, sehingga lebih sesuai dengan kondisi seismik Indonesia. Kontribusi penelitian

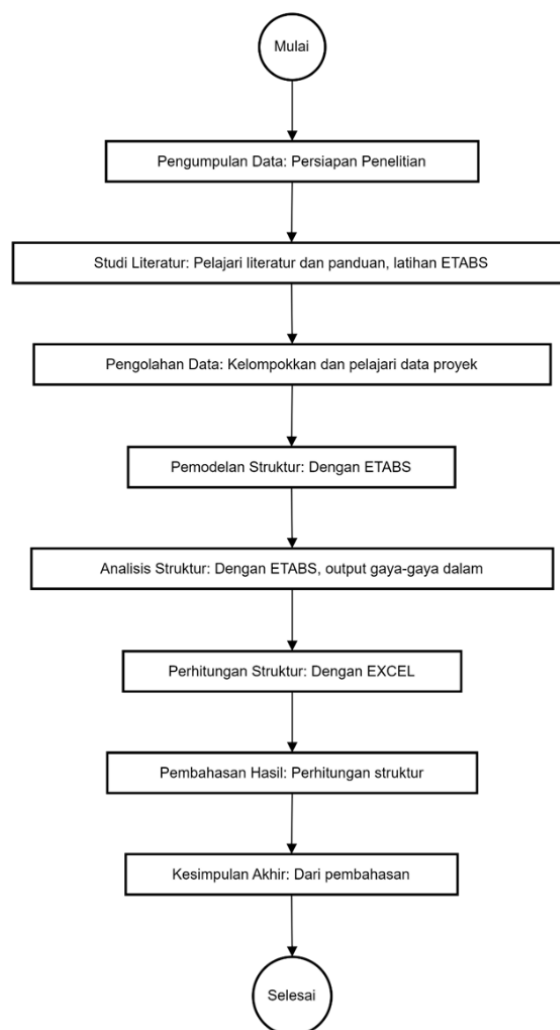
ini adalah menganalisis adaptasi struktur bunker AEET terhadap kondisi seismik lokal dan menyusun parameter desain dengan ketahanan lebih tinggi untuk struktur yang memerlukan proteksi khusus.

Tujuan Penelitian

- Melakukan analisis struktur kolom pada bunker AEET agar memenuhi persyaratan ketahanan gempa sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI).
- Mengidentifikasi kekuatan struktur pelat pada bunker AEET agar sesuai dengan ketentuan ketahanan gempa dalam SNI.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini mengambil studi kasus pada proyek pembangunan fasilitas gedung Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET) yang terletak di kawasan BRIN Lebak Bulus, Jakarta Selatan. Subjek pada penelitian ini adalah proyek pembangunan Bunker Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET), berlokasi di kawasan BRIN Lebak Bulus, Jakarta Selatan. Sedangkan objek pada penelitian ini adalah pekerjaan struktural proyek pembangunan Bunker Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET), yang meliputi analisis struktur menggunakan software ETABS. Fokus penelitian ini adalah pada evaluasi kekuatan dan stabilitas struktur pelat dan kolom, untuk memastikan desain dan konstruksi yang sesuai dengan standar yang berlaku. Penelitian ini menggunakan data sekunder dari proyek pembangunan Bunker Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET). Metode yang diterapkan dalam pengumpulan data-data yang berkaitan untuk melengkapi penelitian ini yaitu dengan menggabungkan materi-materi yang bersumber dari buku, modul pelatihan, jurnal, skripsi terdahulu, dan artikel-artikel di internet yang berkaitan dengan penelitian ini. Penelitian dilakukan berdasarkan pendekatan studi kasus, literatur, pemodelan dan analisis. Bagan alir atau flowchart penelitian dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 1. Bagan alir penelitian

3. DATA DAN ANALISA

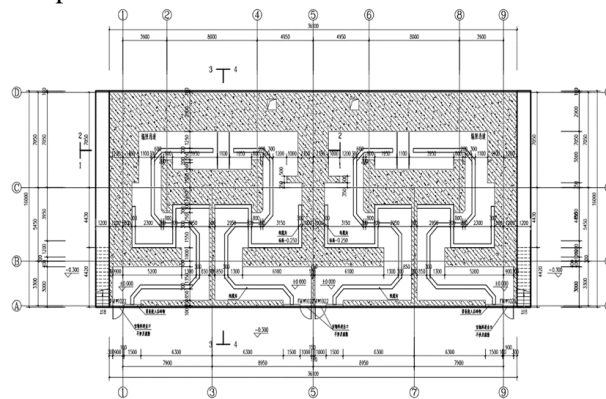
3.1. Data Analisa

Standar yang digunakan untuk verifikasi hasil pada penelitian ini meliputi berbagai Standar Nasional Indonesia (SNI) yang relevan dengan perhitungan dan analisis struktur bangunan tahan gempa serta konstruksi beton. Standar-standar tersebut termasuk:

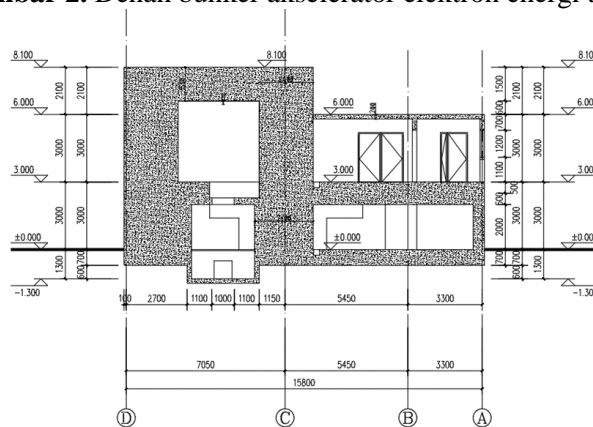
- SNI 1727:2020 - Mengatur beban minimum yang harus diterapkan pada struktur gedung dan bangunan lainnya, seperti beban mati, beban hidup, dan beban gempa.
- SNI 1726:2019 - Mengatur perencanaan bangunan tahan gempa untuk memastikan struktur mampu menghadapi gempa sesuai dengan kategori desain seismik yang berlaku.
- SNI 2847:2019 - Mengatur standar beton struktural, termasuk pengaturan mengenai ketebalan minimum, jarak tulangan, dan komposisi material.

Metode verifikasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ETABS versi 21.2.0 untuk pemodelan struktur, serta perhitungan manual melalui Excel untuk memastikan hasil yang diperoleh sesuai dengan ketentuan SNI yang berlaku

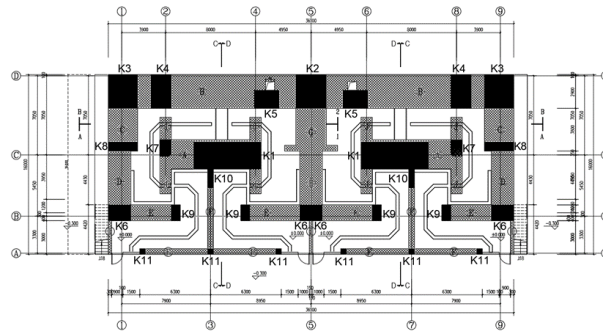
Penelitian ini menggunakan data sekunder dari proyek pembangunan Bunker Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET), berlokasi di kawasan BRIN Lebak Bulus, Jakarta Selatan. Data tersebut diperoleh dari PT. Bergas Karya sebagai konsultan perencanaan.



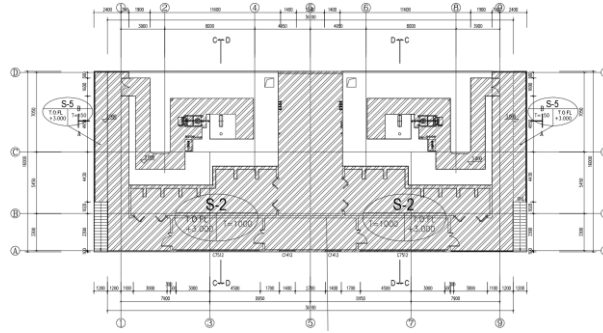
Gambar 2. Denah bunker akselerator elektron energi tinggi



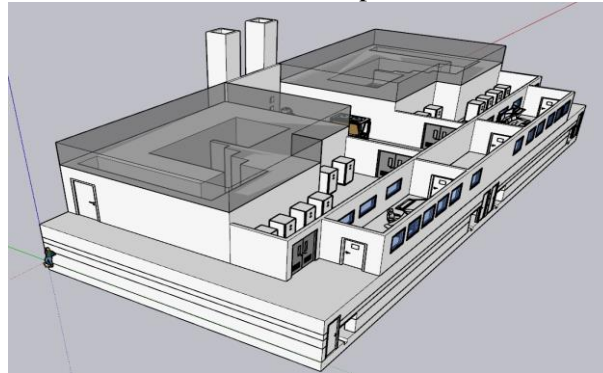
Gambar 3. Tampak melintang



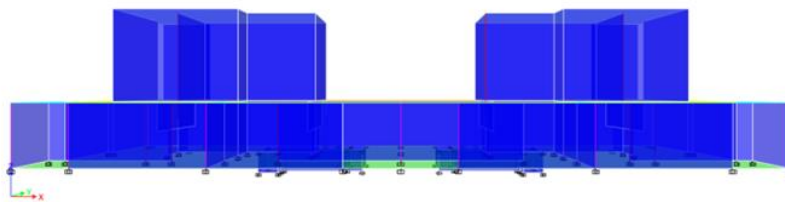
Gambar 4. Denah kolom



Gambar 5. Denah pelat lantai



Gambar 6. Perspektif 3D



Gambar 7. Model struktur 3D tampak depan

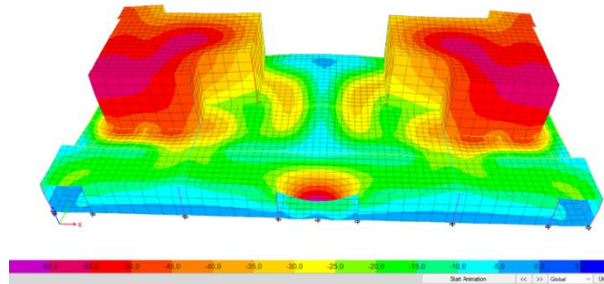


Gambar 8. Model struktur tampak atas

Kombinasi pembebanan diakibatkan beban mati, beban hidup, dan beban gempa yang bekerja pada struktur itu sendiri. SNI 1726:2019 pasal 4.2.2 menjelaskan beberapa kombinasi pembebanan untuk metode ultimit sebagai berikut:

- 1.4DL
- 1.2DL + 1.6LL
- 1.2DL + 1.6(LL atau R) + (1.0LL + 0.5W)
- 1.2DL + 1.0W + 1.0LL + 0.5(LL atau R)
- 1.2DL + 1.0E + 1.0LL
- 0,9DL + 1.0E

3.1. Analisis Struktur Kolom dan Pelat Lantai



Gambar 9. Hasil run analisis dengan PGA 0.3g

Setelah dilakukan analisis menggunakan software ETABS, diperoleh gaya-gaya dalam pada struktur kolom dan pembebanan pelat lantai sebagai berikut:

Tabel 1. Gaya-gaya dalam struktur kolom

Kolom	P (kN)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
K1	44.170,76	137,42	5.673,22
K2	13.545,40	78,32	6.028,75
K3	13.192,60	199,73	6.843,04
K4	14.103,60	10,24	863,65
K5	16.806,80	3,24	1.529,36
K6	8.711,08	23,4	1.985,36
K7	7.205,66	1,20	1.424,99
K8	8.494,19	14,05	2.451,67
K9	6.265,79	0,01	773,72
K10	7.210,71	0,12	2.038,30
K11	1.690,82	0,24	297,36

Tabel 2. Pembebanan pada struktur pelat lantai

Pelat Lantai	Tebal Pelat (mm)	Elevasi (m)	Beban Mati Qd (kN/m ²)	Beban Hidup Ql (kN/m ²)
S1	700	±0.00	21,100	4,00
S2	1000	+3.00	28,30	4,00
S3	1500	+8.10	40,300	4,00

3.2. Perhitungan Struktur Struktur Kolom dan Pelat Lantai

3.2.1. Perhitungan Kolom

a. Kolom K1 600x240 cm

- Eksentrisitas kolom

$$e_{au} = e_u + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 58.69 + 120 = 178,69 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot e_{au} = 4.417.075,80 \times 178.69 = 789.290.623,46 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 7.892.906,23 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{f_c'}{0.85 \cdot f_y} = \frac{420}{0.85 \cdot 40} = 12.35$$

- Perhitungan Rn

$$Rn = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-78.929.062.346}{0.85 \cdot 2400 \cdot (2350)^2} = 7,006$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Rn \cdot m}{f_y}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{12.35}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot -7.006 \cdot 12.35}{420}\right)\right)\right) = 0,01525$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,01525 \cdot 2400 \cdot 2350 = 85.984,24 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan} = 8 \text{ d-19 (Aact} = 180 \text{ D25)}$$

$$\text{Aact} = 88.312,50 \text{ mm}^2 > 85.984,24 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

b. Kolom K2 300x270 cm

- Eksentrisitas kolom

$$eau = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 94.25 + 135 = 229,25 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya momen

$$P \cdot eau = 1.319.261,63 \cdot 229,25 = 303.155.717,98 \text{ kg.cm} = 3.031.557,18 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{f_c'}{0.85 \cdot f_y} = \frac{420}{0.85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan Rn

$$Rn = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-31.052.857.762}{0.85 \cdot 2700 \cdot (2660)^2} = 1,912$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Rn \cdot m}{f_y}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot -1,912 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0,00439$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,00439 \cdot 2700 \cdot 2660 = 31.558,31 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan} = 8 \text{ d-19 (Aact} = 72 \text{ D25)}$$

$$\text{Aact} = 35.325,00 \text{ mm}^2 > 31.558,31 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

c. Kolom K3 300x260 cm

- Eksentrisitas kolom

$$eau = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 99,79 + 130 = 229,79 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot eau = 1.319.261,63 \cdot 229,25 = 310,528,577.62 \text{ kg.cm} = 3,105,285.78 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{f_c'}{0.85 \cdot f_y} = \frac{420}{0.85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan Rn

$$Rn = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-30.315.571.798}{0.85 \cdot 2600 \cdot (2560)^2} = 2,093$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Rn \cdot m}{f_y}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot -2,093 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0,00479$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,00479 \cdot 2600 \cdot 2560 = 31.910,31 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan} = 8 \text{ d-19 (Aact} = 70 \text{ D25)}$$

$$\text{Aact} = 34.343,75 \text{ mm}^2 > 31.910,31 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

d. Kolom K4 300x180 cm

- Eksentrisitas kolom

$$eau = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 41,51 + 90 = 131,51 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot eau = 1.410.357,36 \cdot 131,51 = 185.478.768,37 \text{ kg.cm} = 1.854.787,68 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{fc'}{0.85 \cdot fy} = \frac{420}{0.85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan Rn

$$Rn = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-18.547.876.837}{0,85 \cdot 1800 \cdot (1760)^2} = 3,914$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Rn \cdot m}{fy}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot -3,914 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0,00870$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,00870 \cdot 2600 \cdot 2560 = 27.547,16 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan} = 8 \text{ d-19 (Aact} = 64 \text{ D25)}$$

$$\text{Aact} = 31.400,00 \text{ mm}^2 > 27.547,16 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

e. Kolom K5 220x160 cm

- Eksentrisitas kolom

$$eau = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 41,25 + 80 = 121,25 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot eau = 1.680.677,12 \cdot 121,25 = 203.774.056,48 \text{ kg.cm} = 2.037.740,56 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{fc'}{0.85 \cdot fy} = \frac{420}{0.85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan Rn

$$Rn = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-20.377.405.648}{0,85 \cdot 1600 \cdot (1560)^2} = 6,517$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Rn \cdot m}{fy}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot -6,517 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0,01322$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,01322 \cdot 1600 \cdot 1560 = 32.997,06 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan} = 8 \text{ d-19 (Aact} = 72 \text{ D25)}$$

$$\text{Aact} = 35.325,00 \text{ mm}^2 > 32.997,06 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

f. Kolom K6 200x140 cm

- Eksentrisitas kolom

$$eau = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 48,93 + 70 = 118,93 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot eau = 871.107,80 \cdot 118,93 = 103.597.613,98 \text{ kg.cm} = 1.035.976,14 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{fc'}{0.85 \cdot fy} = \frac{420}{0.85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan Rn

$$Rn = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-10.359.761.398}{0,85 \cdot 1400 \cdot (1360)^2} = 4,707$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Rn \cdot m}{fy}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot -4,707 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0,01033$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,01033 \cdot 1400 \cdot 1360 = 19.664,85 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan} = 8 \text{ d-19 (Aact} = 48 \text{ D25)}$$

$$\text{Aact} = 23.550,00 \text{ mm}^2 > 19.664,85 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

g. Kolom K7 148x100 cm

- Eksentrisitas kolom

$$eau = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 42,94 + 50 = 92,94 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot eau = 720.565.62 \cdot 92,94 = 66.971.929,74 \text{ kg.cm} = 669.719,30 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{fc'}{0.85 \cdot fy} = \frac{420}{0.85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan R_n

$$R_n = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-6,697,192,974}{0,85 \cdot 1000 \cdot (960)^2} = 8,549$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot R_n \cdot m}{f_y}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot -8,549 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0,01776$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,01776 \cdot 1000 \cdot 960 = 17.048,08 \text{ mm}^2$$

Tulangan = 8 d-19 (Aact = 44 D25)
Aact = 21.587,50 mm² > 17.048,08 mm² (OK)

h. Kolom K8 260x80 cm

- Eksentrisitas kolom

$$e_{au} = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 44,37 + 40 = 84,37 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot e_{au} = 849.418,64 \cdot 84,37 = 71.672.544,98 \text{ kg.cm} = 716.672,54 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{fc'}{0,85 \cdot f_y} = \frac{420}{0,85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan R_n

$$R_n = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-7,167,254,498}{0,85 \cdot 800 \cdot (760)^2} = 18,248$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot R_n \cdot m}{f_y}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot 18,248 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0,03395$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,03395 \cdot 800 \cdot 760 = 20.643,84 \text{ mm}^2$$

Tulangan = 8 d-19 (Aact = 48 D25)
Aact = 22.682,40 mm² (OK)

i. Kolom K9 140x80 cm

- Eksentrisitas kolom

$$e_{au} = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 27,837 + 40 = 67,837 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot e_{au} = 626,578,80 \cdot 67,837 = 42.502.093,62 \text{ kg.cm} = 425.020,94 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{fc'}{0,85 \cdot f_y} = \frac{420}{0,85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan R_n

$$R_n = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-4,250,209,362}{0,85 \cdot 800 \cdot (760)^2} = 10,821$$

- Perhitungan r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot R_n \cdot m}{f_y}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot 10,821 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0,02184$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0,02184 \cdot 800 \cdot 760 = 13.277,19 \text{ mm}^2$$

Tulangan = 8 d-19 (Aact = 32 D25)
Aact = 15.700,00 mm² > 13.277,19 mm² (OK)

j. Kolom K10 168x50 cm

- Eksentrisitas kolom

$$e_{au} = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 47,438 + 25 = 72,438 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot e_{au} = 721,071,01 \cdot 72,438 = 52.236.227,76 \text{ kg.cm} = 522.362,28 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{fc'}{0,85 \cdot f_y} = \frac{420}{0,85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan R_n

$$R_n = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-5,223,622,776}{0,85 \cdot 500 \cdot (460)^2} = 58,058$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Rn \cdot m}{fy}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot 58,058 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0.08239$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0.08239 \cdot 500 \cdot 460 = 18.950,34 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan} = 8 \text{ d-19 (Aact} = 40 \text{ D25)}$$

$$\text{Aact} = 19.625,00 \text{ mm}^2 > 18.950,34 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

k. Kolom K11 50x50 cm

- Eksentrisitas kolom

$$e_{au} = eu + \left(\frac{1}{2} \cdot ht\right) = 28,107 + 25 = 53,107 \text{ cm}$$

- Perhitungan gaya

$$P \cdot e_{au} = 169,081,45 \cdot 53,107 = 8.980.021,02 \text{ kg.cm} = 89.800,21 \text{ kg.m}$$

- Perhitungan rasio momen

$$m = \frac{fc'}{0,85 \cdot fy} = \frac{420}{0,85 \cdot 30} = 16,47$$

- Perhitungan Rn

$$Rn = \frac{M}{(f \cdot b \cdot d^2)} = \frac{-898.002.102}{0,85 \cdot 500 \cdot (460)^2} = 9,986$$

- Perhitungan nilai r

$$r = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Rn \cdot m}{fy}\right)\right)\right) = \left(\frac{1}{16,47}\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{2 \cdot 9,986 \cdot 16,47}{420}\right)\right)\right) = 0.02036$$

- Pengecekan kolom

$$A_{perlu} = r \cdot b \cdot d = 0.02036 \cdot 500 \cdot 460 = 4.683,04 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tulangan} = 8 \text{ d-19 (Aact} = 12 \text{ D25)}$$

$$\text{Aact} = 5.887,50 \text{ mm}^2 > 4.683,04 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

3.2.2. Perhitungan Pelat Lantai

a. Pelat lantai S1 70 cm

- Beban rencana terfaktor

$$W_u = 1,2 \cdot W_D + 1,6 \cdot W_L = 1,2 (21,10) + 1,6 (4,00) = 31,720 \text{ kN/m}^2$$

- Momen pelat akibat beban terfaktor

$$M_{ultx} = C_{lx} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 33,290 \text{ kNm/m}$$

$$M_{ulty} = C_{ly} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 14,956 \text{ kNm/m}$$

$$M_{utx} = C_{tx} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 9,167 \text{ kNm/m}$$

$$M_{uty} = C_{ty} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 27,500 \text{ kNm/m}$$

$$M_u = 33,290 \text{ kNm/m}$$

- Penulangan pelat

$$r_b = \beta_1 \cdot 0,85 \cdot \frac{fc'}{fy} \cdot \frac{600}{600+fy} = 0,0325$$

$$R_{max} = 0,75 \cdot r_b \cdot fy \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot 0,75 \cdot r_b \cdot \frac{fy}{0,85 \cdot fc'}\right] = 7,8883$$

$$d_s = t_s + \frac{D}{2} = 61,0 \text{ mm}$$

$$\text{Momen nominal rencana } M_n = \frac{M_u}{\phi} = 41,612 \text{ kNm}$$

$$\text{Faktor tahanan momen } R_n = \frac{M_n \cdot 10^{-6}}{b \cdot d^2} = 0,10191 \text{ dimana } R_n < R_{max} \text{ (OK)}$$

$$\text{Rasio tulangan yang diperlukan } \rho = 0,85 \cdot \frac{fc'}{fy} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{R_n}{0,85 \cdot fc'}}\right] = 0,0003$$

$$\text{Rasio tulangan yang digunakan } \rho = 0,0025$$

$$\text{Luas tulangan yang diperlukan } A_s = \rho \cdot b \cdot d = 1598 \text{ mm}^2$$

$$\text{Digunakan tulangan D22-200 } A_s = \frac{\pi}{4} \times \phi^2 \times b/s = 1901 \text{ mm}^2$$

- Kontrol lendutan pelat

$$\text{Batas lendutan maksimum izin} = \frac{L_x}{240} = 8,125 \text{ mm}$$

$$\text{Momen inersia bruto penampang pelat } I_g = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = 28583333333 \text{ mm}^3$$

$$\text{Lendutan elastis seketika } \delta_e = \frac{5}{384} \times \frac{Q \times L_x^4}{E_c \times I_e} = 0,103 \text{ mm}$$

$$\text{Faktor jangka waktu } \lambda = \frac{\zeta}{1+50 \times \rho} = 1,7411$$

Lendutan jangka panjang akibat rangkai dan susut $\delta_g = \lambda \times \frac{5}{384} \times \frac{Q \times L_x^4}{E_c \times I_e} = 0,179 \text{ mm}$

Lendutan total $\delta_{tot} = \delta_e + \delta_g = 0,282 \text{ mm}$ dimana $\delta_{tot} \leq \frac{L_x}{480} = 0,282 \leq 8,125$ (**AMAN**)

b. Pelat lantai S2 100 cm

- Beban rencana terfaktor

$$W_u = 1,2 \cdot W_D + 1,6 \cdot W_L = 1,2 (28,30) + 1,6 (4,00) = 40,36 \text{ kN/m}^2$$

- Momen pelat akibat beban terfaktor

$$M_{ulx} = C_{lx} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 42,357 \text{ kNm/m}$$

$$M_{uly} = C_{ly} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 19,030 \text{ kNm/m}$$

$$M_{utx} = C_{tx} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 11,664 \text{ kNm/m}$$

$$M_{uty} = C_{ty} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 34,991 \text{ kNm/m}$$

$$M_u = 42,357 \text{ kNm/m}$$

- Penulangan pelat

$$r_b = \beta_1 \cdot 0,85 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y} = 0,0325$$

$$R_{max} = 0,75 \cdot r_b \cdot f_y \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot 0,75 \cdot r_b \cdot \frac{f_y}{0,85 \cdot f'_c} \right] = 7,8883$$

$$d_s = t_s + \frac{D}{2} = 61,0 \text{ mm}$$

$$\text{Momen nominal rencana } M_n = \frac{M_u}{\phi} = 52,947 \text{ kNm}$$

$$\text{Faktor tahanan momen } R_n = \frac{M_n \cdot 10^{-6}}{b \cdot d^2} = 0,06005 \text{ dimana } R_n < R_{max} \quad (\text{OK})$$

$$\text{Rasio tulangan yang diperlukan } \rho = 0,85 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{R_n}{0,85 \cdot f'_c}} \right] = 0,0002$$

$$\text{Rasio tulangan yang digunakan } \rho = 0,0035$$

$$\text{Luas tulangan yang diperlukan } A_s = \rho \cdot b \cdot d = 2348 \text{ mm}^2$$

$$\text{Digunakan tulangan D22-200 } A_s = \frac{\pi}{4} \times \phi^2 \times b/s = 2376 \text{ mm}^2$$

- Kontrol lendutan pelat

$$\text{Batas lendutan maksimum izin} = \frac{L_x}{240} = 8,125 \text{ mm}$$

$$\text{Momen inersia bruto penampang pelat } I_g = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = 83333333333 \text{ mm}^3$$

$$\text{Lendutan elastis seketika } \delta_e = \frac{5}{384} \times \frac{Q \times L_x^4}{E_c \times I_e} = 0,045 \text{ mm}$$

$$\text{Faktor jangka waktu } \lambda = \frac{\zeta}{1 + 50 \times \rho} = 1,7754$$

$$\text{Lendutan jangka panjang akibat rangkai dan susut } \delta_g = \lambda \times \frac{5}{384} \times \frac{Q \times L_x^4}{E_c \times I_e} = 0,081 \text{ mm}$$

$$\text{Lendutan total } \delta_{tot} = \delta_e + \delta_g = 0,126 \text{ mm} \text{ dimana } \delta_{tot} \leq \frac{L_x}{480} = 0,126 \leq 8,125$$
 (**AMAN**)

c. Pelat lantai S3 150 cm

- Beban rencana terfaktor

$$W_u = 1,2 \cdot W_D + 1,6 \cdot W_L = 1,2 (40,30) + 1,6 (4,00) = 54,76 \text{ kN/m}^2$$

- Momen pelat akibat beban terfaktor

$$M_{ulx} = C_{lx} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 57,470 \text{ kNm/m}$$

$$M_{uly} = C_{ly} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 25,820 \text{ kNm/m}$$

$$M_{utx} = C_{tx} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 15,825 \text{ kNm/m}$$

$$M_{uty} = C_{ty} \cdot 0,001 \cdot W_u \cdot L_x^2 = 47,475 \text{ kNm/m}$$

$$M_u = 57,470 \text{ kNm/m}$$

- Penulangan pelat

$$r_b = \beta_1 \cdot 0,85 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y} = 0,0325$$

$$R_{max} = 0,75 \cdot r_b \cdot f_y \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot 0,75 \cdot r_b \cdot \frac{f_y}{0,85 \cdot f'_c} \right] = 7,8883$$

$$d_s = t_s + \frac{D}{2} = 61,0 \text{ mm}$$

$$\text{Momen nominal rencana } M_n = \frac{M_u}{\phi} = 71,838 \text{ kNm}$$

$$\text{Faktor tahanan momen } R_n = \frac{M_n \cdot 10^{-6}}{b \cdot d^2} = 0,03469 \text{ dimana } R_n < R_{max} \quad (\text{OK})$$

$$\text{Rasio tulangan yang diperlukan } \rho = 0,85 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{R_n}{0,85 \cdot f'_c}} \right] = 0,0001$$

$$\text{Rasio tulangan yang digunakan } \rho = 0,0025$$

$$\text{Luas tulangan yang diperlukan } A_s = \rho \cdot b \cdot d = 3598 \text{ mm}^2$$

Digunakan tulangan D22-200 $A_s = \frac{\pi}{4} \times \phi^2 \times b/s = 3801 \text{ mm}^2$

- Kontrol lendutan pelat

Batas lendutan maksimum izin $= \frac{L_x}{240} = 8,125 \text{ mm}$

Momen inersia bruto penampang pelat $I_g = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = 28125000000 \text{ mm}^3$

Lendutan elastis seketika $\delta_e = \frac{5}{384} \times \frac{Q \times L_x^4}{E_c \times I_e} = 0,018 \text{ mm}$

Faktor jangka waktu $\lambda = \frac{\zeta}{1+50 \times \rho} = 1,7667$

Lendutan jangka panjang akibat rangkai dan susut $\delta_g = \lambda \times \frac{5}{384} \times \frac{Q \times L_x^4}{E_c \times I_e} = 0,033 \text{ mm}$

Lendutan total $\delta_{tot} = \delta_e + \delta_g = 0,051 \text{ mm}$ dimana $\delta_{tot} \leq \frac{L_x}{480} = 0,051 \leq 8,125$ (**AMAN**)

Berdasarkan hasil perhitungan untuk setiap kolom struktur, diperoleh data yang menunjukkan bahwa setiap kolom telah memenuhi syarat kekuatan yang diperlukan. Hal ini ditunjukkan dengan perbandingan antara luas penampang tulangan yang diperlukan (A_{perlu}) dengan luas penampang tulangan aktual (A_{act}). Setiap kolom memiliki A_{act} yang lebih besar daripada A_{perlu} , sehingga dapat disimpulkan bahwa kapasitas kolom melebihi kebutuhan minimum untuk menahan beban yang diterapkan. Ini menunjukkan bahwa desain kolom memiliki faktor keamanan yang cukup dalam kondisi beban maksimum yang diantisipasi.

Eksentrisitas kolom (e_{au}) dihitung untuk mengantisipasi momen akibat beban eksentris yang dapat menyebabkan ketidakstabilan kolom. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai eksentrisitas pada kolom berkisar antara 53,107 cm hingga 229,79 cm. Nilai ini masih dapat diterima dalam kaitannya dengan dimensi kolom yang ada, yang berarti kolom mampu mengakomodasi momen yang timbul tanpa risiko ketidakstabilan.

Rasio momen (m) untuk setiap kolom dihitung dalam rentang nilai 12,35 hingga 16,47. Rasio ini dihitung berdasarkan perbandingan antara kekuatan tekan beton (f_c') dan kekuatan tarik baja (f_y). Konsistensi nilai rasio momen dalam setiap perhitungan menunjukkan bahwa parameter material yang digunakan stabil, sesuai dengan spesifikasi desain dan karakteristik material beton dan baja yang dipilih.

Dalam analisis ini, hasil perhitungan kolom telah dibandingkan dengan standar desain yang berlaku, seperti SNI 2847 dan ACI 318, yang menetapkan persyaratan untuk dimensi, kapasitas penampang tulangan, serta pengaruh eksentrisitas terhadap stabilitas kolom. Berdasarkan parameter dan metode yang diacu, hasil perhitungan menunjukkan kesesuaian dengan standar tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa kolom yang didesain memiliki kekuatan dan keamanan yang memenuhi kriteria struktur bangunan sesuai standar perencanaan beton bertulang.

Berdasarkan hasil perhitungan dan pengecekan, semua kolom yang dirancang telah memenuhi syarat kekuatan sesuai dengan kapasitas tulangan yang disediakan. Seluruh hasil menunjukkan status kolom dalam kondisi "OK", yang berarti desain kolom mampu menahan beban dengan tingkat keamanan yang memadai. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai-nilai gaya, rasio momen, dan faktor ketahanan yang diperhitungkan sesuai dengan persyaratan desain dan konsisten secara metodologis.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa dan perhitungan struktur kolom dan pelat lantai Bunker Akselerator Elektron Energi Tinggi BRIN Lebak Bulus Jakarta Selatan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Analisis dan perhitungan struktur kolom menggunakan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019, hasil menunjukkan bahwa kolom Bunker Akselerator Elektron Energi Tinggi (AEET) mampu menahan beban aksial dan momen yang dihasilkan selama operasional. Penulangan kolom telah dirancang sesuai dengan persyaratan keamanan dan ketahanan struktur terhadap gempa dengan percepatan gempa dasar sebesar 0,3g.
2. Analisis dan perhitungan pelat Bunker AEET menunjukkan bahwa pelat mampu menahan gaya-gaya dalam yang terjadi pada saat simulasi beban. Penulangan pelat berdasarkan perhitungan teoritis dengan mengacu pada SNI 1727:2020 menunjukkan bahwa struktur pelat memenuhi persyaratan desain yang aman.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Allam, S. M., Elbakry, H. M. F., & Arab, I. S. E. (2018). Exterior reinforced concrete beam column joint subjected to monotonic loading. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 4133–4144. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.10.015>
- Al-Rousan, R. Z., Alhassan, M. A., & Al-omary, R. J. (2021). Response of interior beam-column connections integrated with various schemes of CFRP composites. *Case Studies in Construction Materials*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00488>
- American Concrete Institute. (2019). *ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). SNI 1726:2019 - Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019 - Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2020). SNI 1727:2020 - Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Guci, J. M., Safitri, R. A., & Nurjaen, A. (2021). Perencanaan Bangunan Gedung Tahan Gempa 11 Lantai Dengan Sistem Ganda. *Structure*, 3(2), 125. <https://doi.org/10.31000/civil.v3i2.7162>
- Manalip, H., Kumaat, E. J., & Windah, R. S. (2022). *STATIKA*. Unsrat Press.
- Padole, C., Bansod, S., Sukhdeve, T., Dhomne, A., Nagose, M., Hanwate, P., & Varghese, Dr. V. (2021). Analysis And Design Of G+4 Residential Building Using Etabs. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(12). <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2021.v05i12.044>
- Pratomo, R. B., & Hudori, M. (2021). Analisis Perhitungan Struktur Pelat Lantai Pada Proyek Pembangunan Gedung Solnet. *Conference on Business, Social Sciences and Technology (CoNeScINTech)*, 1(1), 765–770.
- Putri, A., Masril, M., & Bastian, E. (2021). Analisis Struktur Pasca Kebakaran Gedung Pascasarjana Universitas Muhammdiyah Sumatera Barat. *Ensiklopedia Research and Community Service Review*, 1(1), 179–187. <https://doi.org/10.33559/err.v1i1.1109>
- Razvi, S. W. N., & Shaikh, M. G. (2018). Effect of confinement on behavior of short concrete column. *Procedia Manufacturing*, 20, 563–570.
- Sholeh, M. N. (2019). *Mekanika Rekayasa Ilmu Dasar Teknik Sipil*. Deepublish.
- Siswanto, A. B. (2018). Kriteria dasar perencanaan struktur bangunan tahan gempa. *Jurnal Teknik Sipil*, 11, 59–72.