

EVALUASI DAN ANALISIS PERKUATAN BANGUNAN YANG BERTAMBAH JUMLAH TINGKATNYA

Cintya Violita Saruni

Servie O. Dapas, H. Manalip

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi

Email: cintya.violita@gmail.com

ABSTRAK

Penambahan tingkat pada sebuah bangunan merupakan suatu alternatif untuk menjawab masalah peningkatan jumlah orang di dalam suatu bangunan, perubahan fungsi bangunan, penambahan infrastruktur ataupun keterbatasan lahan. Evaluasi struktur bangunan awal dibutuhkan untuk mengetahui kemampuan struktur bangunan akibat dari penambahan tingkat bangunan. Jika struktur tidak mampu menerima beban yang ditambahkan, maka dibutuhkan perkuatan terhadap elemen-elemen struktur eksisting yang tidak kuat.

Pradesain struktur dilakukan untuk mendapatkan struktur awal bangunan 2 lantai yang difungsikan sebagai sekolah menggunakan SNI 2847:2013. Evaluasi struktur yang direncanakan dengan menambahkan 1 tingkat sehingga menjadi bangunan 3 tingkat yang dimodelkan 3D menggunakan program ETABS. Denah bangunan berukuran 22.5 m x 12 m dengan tinggi bangunan 3.8 m tiap lantai dengan mutu beton, f_c' 25 MPa, mutu tulangan baja, f_y 240 MPa untuk diameter tulangan lebih kecil atau sama dengan 10 mm, f_y 400 MPa untuk diameter tulangan lebih besar dari 10 mm. Elemen struktur dan pembebanan untuk tingkat yang ditambahkan sama dengan struktur awal dan analisa gempa dengan statik ekuivalen. Analisis beban gempa berdasarkan SNI 1726:2012. Struktur di evaluasi dengan program ETABS.

Hasil evaluasi struktur yaitu kemampuan struktur awal meliputi balok, kolom dan pelat akibat penambahan tingkat serta periode struktur. Perkuatan elemen struktur yang dilakukan dengan concrete jacketing dan dilakukan beberapa pemodelan untuk dijadikan rekomendasi perkuatan.

Kata kunci: *Penambahan tingkat, Evaluasi struktur, Perkuatan, Concrete Jacketing, ETABS.*

PENDAHULUAN

Latar belakang

Terjadinya pertumbuhan penduduk, berkembangnya zaman, serta meningkatnya kebutuhan-kebutuhan lain ternyata berpengaruh pada aspek pembangunan sebuah konstruksi entah itu rumah, gedung kampus, sekolah, gedung perkantoran, rumah sakit, mall, hotel, *apartment*, dan jenis bangunan-bangunan lainnya sehingga mendorong dilaksanakannya pengembangan dari gedung tersebut.

Sekolah merupakan salah satu bangunan yang membutuhkan pengembangan misalnya karena peningkatan jumlah siswa di sekolah ataupun adanya penambahan infrastruktur sedangkan lahan yang ada terbatas, maka salah satu alternatif yang diperlukan adalah penambahan tingkat bangunan

Dikarenakan adanya penambahan tingkat dari sebuah bangunan, maka tentunya dibutuhkan evaluasi dari struktur bangunan eksisting agar dapat diketahui kemampuan struktur bangunan

akibat dari penambahan tingkat bangunan tersebut, apakah struktur bangunan tersebut masih layak setelah adanya penambahan beban dengan kondisi awal struktur atau perlu dilakukan perkuatan struktur jika struktur tidak mampu menerima beban akibat penambahan tingkat bangunan.

Yang sangat penting untuk diperhatikan dalam kasus penambahan tingkat bangunan yaitu apabila setelah dievaluasi dan struktur tidak mampu menahan beban yang ditambahkan terhadap gedung tersebut, maka dibutuhkan perkuatan terhadap elemen-elemen struktur yang tidak kuat akibat menahan penambahan beban yang terjadi. Perkuatan dibutuhkan agar elemen-elemen struktur pada gedung eksisting mampu menahan beban yang bekerja akibat penambahan tingkat bangunan.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut: bagaimana

mengetahui pengaruh penambahan tingkat bangunan terhadap struktur bangunan awal (eksisting), cara evaluasi struktur awal dan perencanaan perkuatan struktur jika dibutuhkan perkuatan.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan hasil evaluasi struktur akibat rencana penambahan tingkat bangunan dan sebagai rekomendasi perencanaan perkuatan pada elemen-elemen struktur eksisting yang dibutuhkan perkuatan

Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini sebagai referensi untuk perkuatan struktur dengan tipe gedung seperti yang dimodelkan yang memerlukan penambahan tingkat bangunan, guna keamanan dan kenyamanan pengguna bangunan serta tujuan dari fungsi bangunan tersebut dapat dicapai dan mengaplikasikan pengetahuan tentang struktur beton bertulang pada *software ETABS* dalam membantu mengevaluasi dan merencanakan struktur bangunan.

Batasan Masalah

1. Bangunan yang akan diteliti adalah bangunan 2 lantai dengan konstruksi beton bertulang berdasarkan pemodelan yang dianggap eksisting
2. Fungsi bangunan yaitu sekolah
3. Gedung termasuk gedung beraturan, sehingga analisa gempa yang ditinjau adalah Statik Ekuivalen
4. Analisa dan evaluasi struktur akibat penambahan lantai bangunan menggunakan program *ETABS*
5. Pemodelan *open frame* tiga dimensi (3D)
6. Perkuatan struktur yang digunakan yaitu *concrete jacketing* dengan memperbesar penampang dan atau menambah jumlah tulangan
7. Tidak dilakukan tinjauan terhadap pengaruh pondasi

LANDASAN TEORI

Pembebanan

Beban adalah gaya luar yang bekerja pada suatu struktur. Pada umumnya penentuan besarnya beban hanya merupakan suatu estimasi

saja. Meskipun beban yang bekerja pada suatu lokasi dari struktur dapat diketahui secara pasti, distribusi beban dari elemen ke elemen dalam suatu struktur pada umumnya memerlukan asumsi dan pendekatan

Beban mati adalah beban gravitasi yang berasal dari berat semua komponen gedung/ bangunan yang bersifat permanen selama masa layan struktur tersebut. Termasuk pula ke dalam jenis beban mati adalah unsur- unsur tambahan, mesin serta peralatan tetap yang tak terpisahkan dari gedung tersebut. Selain itu berat sendiri struktur, sistem perpipaan, jaringan listrik, penutup lantai, serta plafon juga termasuk jenis beban mati

Tabel 1. Berat sendiri Bahan Bangunan dan Komponen Gedung

Bahan Bangunan	Berat
Baja	7850 kg/m ³
Beton	2200kg/m ³
Beton bertulang	2400kg/m ³
Kayu (kelas I)	1000kg/m ³
Pasir (kering udara)	1600kg/m ³

Beban hidup termasuk kedalam kategori beban gravitasi, yaitu jenis beban yang timbul akibat penggunaan suatu gedung selama masa layan gedung tersebut.

Berdasarkan SNI 1727-1989, beban hidup untuk lantai gedung sekolah dan lantai atap yaitu:

$$\text{Sekolah} = 250 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Lantai atap} = 100 \text{ kg/m}^2$$

Beban gempa merupakan beban dalam arah horizontal dari struktur yang ditimbulkan oleh adanya gerakan tanah akibat gempa bumi, baik dalam arah vertikal maupun horizontal.

Kombinasi Pembebanan

SNI 1726-2012 Pasal 4.2.2 Kombinasi beban untuk metode ultimit:

1. 1,4D
 2. 1.2D + 1.6L + 0.5(Lr atau R)
 3. 1.2D + 1,6(Lr atau R) + (L atau 0.5W)
 4. 1,2D + 1,0 W + L + 0.5(Lr atau R)
 5. 1,2D + 1,0E + L
 6. 0.9D + 1,0W
 7. 0.9D + 1,0 E
- Kombinasi dasar untuk desain kekuatan
8. (1.2 + 0.2 SDS)D + ρQe + L
 9. (0.9 – 0.2 SDS)D + ρQe + 1.6H

Standar Perencanaan

Di Indonesia sendiri peraturan desain struktur beton diatur dalam SNI 2847:2013 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, yang disusun dengan mengacu pada peraturan ACI. Dengan menggunakan konsep ini, maka persyaratan dasar yang harus dipenuhi dalam desain adalah:

$$\begin{aligned} \text{Kuat rencana} &\geq \text{Kuat Perlu} \\ \emptyset (\text{Kuat Nominal}) &\geq U \end{aligned}$$

Secara khusus untuk elemen struktur yang memikul momen lentur, gaya geser, dan gaya aksial, maka dapat dituliskan secara lebih khusus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \emptyset M_n &\geq M_u \\ \emptyset V_n &\geq V_u \\ \emptyset P_n &\geq P_u \end{aligned}$$

Faktor Reduksi Kekuatan

Dalam SNI 2847:2013 Pasal 9.3 digunakan beberapa nilai faktor reduksi kekuatan \emptyset , sebagai berikut :

Untuk penampang terkendali tarik $\emptyset = 0.90$

Untuk penampang terkendali tekan:

- a. Dengan tulangan spiral $\emptyset = 0.75$
- b. Tulangan non spiral $\emptyset = 0.65$
- Untuk geser dan puntir $\emptyset = 0.75$
- Untuk tumpu pada beton $\emptyset = 0.65$

Balok

Balok adalah elemen struktur yang menyalurkan beban-beban *tributary* dari slab lantai ke kolom penyangga yang vertikal. Balok dikenal sebagai elemen lentur, yaitu elemen struktur yang dominan memikul gaya dalam berupa momen lentur dan juga geser

Keruntuhan pada Balok

1. Penampang *balanced*.
Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan
2. Penampang *over-reinforced*.
Keruntuhan ditandai dengan hancurnya beton yang tertekan. Pada saat awal keruntuhan, regangan baja ϵ_s yang terjadi masih lebih kecil daripada regangan lelehnya ϵ_y .
3. Penampang *under-reinforced*.
Keruntuhan ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan baja kondisi penampang yang demikian dapat terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi *balanced*

Kolom

Kolom adalah elemen vertikal yang memikul sistem lantai struktural. Elemen ini merupakan elemen yang mengalami tekan dan pada umumnya disertai dengan momen lentur. Kolom meneruskan beban-beban dari elevasi atas ke elevasi yang lebih di bawah hingga akhirnya sampai ke tanah melalui pondasi. Karena kolom merupakan komponen tekan maka keruntuhan pada satu kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan *collapse* (runtuhnya) lantai yang bersangkutan, dan juga runtuh batas total (*ultimate total collapse*) seluruh strukturnya

Persyaratan Peraturan SNI 2847:2013

1. Pasal 9.3.2.2, memberikan batasan untuk faktor reduksi kekuatan, \emptyset , yaitu sebesar 0.65 untuk sengkang persegi dan $\emptyset = 0.75$ untuk sengkang spiral
2. Pasal 10.9.1, mensyaratkan bahwa persentase minimum tulangan memanjang adalah 1%, dengan nilai maksimum 8%, terhadap luas total penampang kolom.
3. Pasal 10.9.2, menyatakan bahwa minimal harus dipasang 4 buah tulangan memanjang untuk kolom dengan sengkang persegi atau lingkaran, minimal 3 buah untuk kolom berbentuk segitiga, serta minimal 4 buah untuk kolom dengan sengkang spiral.
4. Pasal 7.10.5.1, tulangan sengkang harus memiliki diameter minimum 10 mm untuk mengikat tulangan memanjang dengan diameter 32 mm atau kurang, sedangkan untuk tulangan memanjang dengan diameter diatas 32 mm harus diikat dengan sengkang berdiameter minimum 13 mm.
5. Pasal 7.10.5.2, jarak vertikal sengkang atau sengkang ikat tidak boleh melebihi 16 kali diameter tulangan memanjang, 48 kali diameter sengkang/ sengkang ikat, atau dimensi terkecil dari penampang kolom.

Untuk memeriksa kekuatan dari kolom-kolom pada struktur yang direncanakan dilakukan analisa struktur dengan rasio tegangan (*stress ratio*) dari penampang kolom. Rasio tegangan ini menunjukkan perbandingan antara gaya-gaya dalam yang harus didukung dengan kemampuan daya dukung penampang kolom

Pelat

Pelat adalah suatu elemen horisontal utama yang berfungsi untuk menyalurkan beban hidup, baik yang bergerak maupun statis ke elemen

pemikul beban vertikal, yaitu balok ataupun kolom

Apabila pelat tertumpu di keempat sisinya, dan rasio bentang panjang terhadap bentang pendek lebih besar atau sama dengan 2, maka hampir 95% beban akan dilimpahkan dalam arah bentang pendek dan pelat akan menjadi sistem pelat satu arah. Apabila struktur pelat beton ditopang di keempat sisinya, dan rasio antar bentang panjang terhadap bentang pendeknya kurang dari 2, maka pelat tersebut dikategorikan sebagai sistem pelat dua arah.

Ketebalan minimum pelat

1. Untuk $0.2 < \alpha_{fm} < 2.0$

$$h = \frac{\ln\left(0.8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 5\beta (\alpha_{fm} - 0.2)}$$

namun tidak kurang dari 125mm

2. Untuk $\alpha_{fm} > 2.0$

$$h = \frac{\ln\left(0.8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 9\beta}$$

namun tidak kurang dari 90mm

3. Untuk $\alpha_{fm} < 0.2$

h = ketebalan minimum pelat tanpa balok (pada Tabel 2.4)

Tabel 3. Tebal minimum pelat tanpa balok dalam

f _y (MPa)	Tanpa Penebalan Panel			Dengan Penebalan Panel		
	Panel Luar		Panel Dalam	Panel Luar		Panel Dalam
	Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi		Tanpa Balok Tepi	Dengan Balok Tepi	
280	ln/33	ln/36	ln/36	ln/36	ln/40	ln/40
420	ln/30	ln/33	ln/33	ln/33	ln/36	ln/36
520	ln/28	ln/31	ln/31	ln/31	ln/34	ln/34

Keterangan :

- ln = panjang bentang bersih
- β = rasio bentang bersih arah panjang terhadap arah pendek
- α_{fm} = nilai rata-rata α_f untuk semua balok pada tepi-tepi dari suatu pelat
- α_f = rasio kekakuan lentur penampang balok (E_c I_b) terhadap kekakuan lentur pelat (E_c I_s)
- α_f = $\frac{E_c I_b}{E_c I_s}$
- I_b = Momen inersia bruto dari penampang balok terhadap sumbu berat
- I_s = Momen inersia bruto dari penampang pelat

Syarat $\phi M_n \geq M_u$

Kuat momen nominal pelat

$$\phi M_n = \phi A_s f_y (d - a/2)$$

Perkuatan Struktur

Perubahan pada sebuah struktur akan menyebabkan bangunan menjadi tidak aman sebab pada perencanaan awal tidak diperkirakan mengenai perubahan kegunaan bangunan. Hal ini akan berdampak pada kekuatan struktur dalam menerima beban yang mungkin akan lebih besar. Dengan kata lain apabila struktur menerima beban yang lebih besar dari perencanaan maka ada kemungkinan struktur akan mengalami runtuh (*collapse*) akibat adanya perubahan momen pada daerah kolom maupun balok.

Diperlukan perkuatan struktur pada setiap bangunan yang akan diahli fungsikan dan atau beban yang akan di terima oleh bangunan lebih besar dari beban awalnya.

Ada dua jenis perbaikan yang dapat dilakukan dalam pekerjaan *retrofitting* yaitu *repairing* dan *strengthening*. Istilah *repairing* diterapkan pada bangunan yang sudah rusak, dimana telah terjadi penurunan kekuatan, untuk dikembalikan seperti semula. Sedangkan *strengthening* adalah suatu tindakan modifikasi struktur, mungkin belum terjadi kerusakan, dengan tujuan untuk menaikkan kekuatan atau kemampuan bangunan untuk memikul beban-beban yang lebih besar akibat perubahan fungsi bangunan dan stabilitas

Concrete Jacketing

Dimana konsep dasar metode *Concrete Jacketing* ini adalah perbesaran dimensi dan penambahan tulangan pada elemen struktur untuk meningkatkan kinerja elemen tersebut. Pembesaran tersebut dilakukan dengan *Jacketing*. *Jacketing* dari bahan beton sebagai solusi perkuatan yang efektif yang meningkatkan kinerja seismik kolom. Teknik perkuatan struktur ini digunakan pada kolom bangunan yang bertujuan untuk memperbesar penampang kolom, maka penampang kolom menjadi besar daripada sebelumnya sehingga kekuatan geser beton menjadi meningkat.

Kelebihan dan kekurangan Metode Concrete Jacketing

Kelebihan:

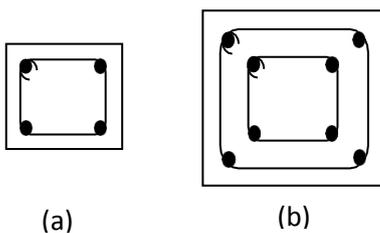
- Mampu meningkatkan kedaktilitasan dari gedung
- Material mudah didapat
- Pekerjaan mudah dimengerti pada tukang

Kekurangan:

- Beton yang lama dibongkar pada sisi-sisinya sehingga waktu pekerjaan sedikit lebih lama daripada FRP
- Biaya relatif mahal dikarenakan adanya penambahan tulangan dan beton untuk pengecoran daerah yang akan ditambah dimensinya
- Pekerjaan lebih lama karena harus menunggu kekuatan beton untuk mencapai kekerasan maksimum

Menurut dokumen CED 39 (7428) “*Seismic Evaluation and Strengthening of Existing Reinforced Concrete Buildings – Guidelines*” yang merupakan standar India untuk evaluasi beban gempa dan perkuatan beton bertulang, spesifikasi minimum yang harus dipenuhi untuk *concrete jacketing* antara lain :

- Mutu beton pembungkus yang harus lebih besar atau sama dari mutu beton eksisting.
- Untuk kolom yang tulangan longitudinal tambahan tidak dibutuhkan, minimum harus diberikan tulangan D12 mm di keempat ujungnya dengan sengkang Ø8 mm.
- Minimum tebal *jacketing* 100 mm.
- Diameter tulangan sengkang minimum Ø8 mm tidak boleh kurang 1/3 Ø tulangan longitudinal.
- Jarak maksimal tulangan sengkang pada daerah ¼ bentang adalah 100 mm, dan jarak vertikal antar tulangan sengkang tidak boleh melebihi 100 mm.

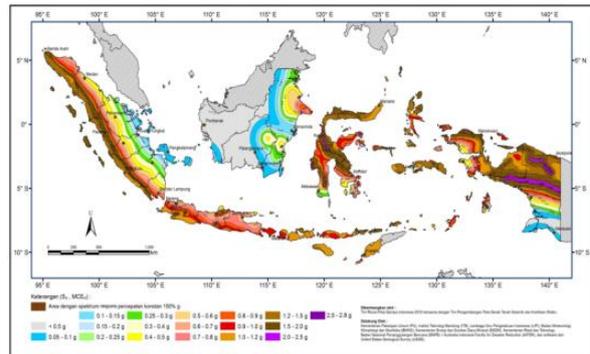


Gambar 2. (a) Kolom asli (b) kolom *Jacketing*

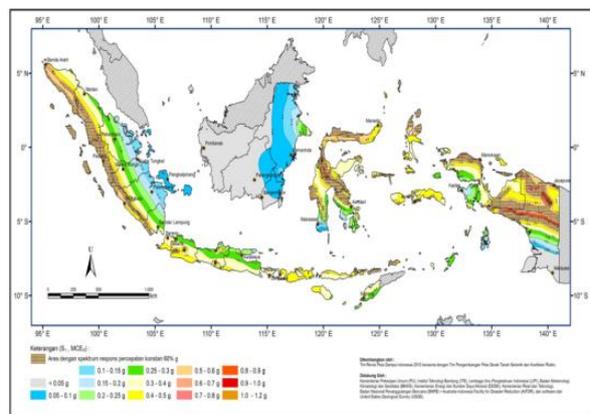
Analisa Gempa

- Kategori risiko struktur bangunan
- Parameter percepatan terpetakan
Parameter S_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) harus ditetapkan masing-masing dari respon spectral

percepatan 0.2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismik.



Gambar 3. Menentukan nilai S_s



Gambar 4. Menentukan nilai S_1

- Parameter Spectrum Respon percepatan S_{MS} dan S_{M1}

$$S_{MS} = F_a S_s$$

$$S_{M1} = C S_1$$

Keterangan:

S_s = parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode pendek.

S_1 = parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode 1,0 det

- Parameter percepatan spectral desain S_{DS} dan SD_1

Parameter percepatan spectral desain untuk periode pendek S_{DS} dan periode 1 detik SD_1 ditentukan dengan persamaan:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$$

- Faktor keutamaan gempa
- Kategori Desain Gempa

Tabel 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

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

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,167$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

- Faktor modifikasi respons berdasarkan sistem rangkayang dipakai

Statik Ekuivalen

- Periode Fundamental
 Periode fundamental (T_a), dalam detik, harus ditentukan dari persamaan $T_a = C_t h_n^x$ dan untuk periode struktur maksimum $T_{max} = C_u \cdot T_a$

Keterangan:

h_n adalah ketinggian struktur, dalam (m), di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur, untuk Rangka beton pemikul momen koefisien $C_t = 0,0466$ dan $x = 0$

Tabel 6. Koefision untuk batas atas pada perioda yang dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_s
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

- Koefision Respon Seismic (C_s)

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I_e}}$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang

periode pendek

R = faktor modifikasi respons

I_e = faktor keutamaan gempa

- Gaya geser dasar seismic (V)

$$V = C_s W$$

Keterangan:

C_s = koefisien respons seismik

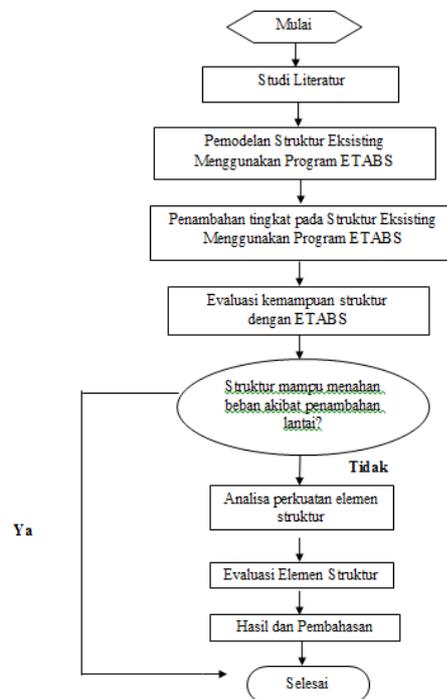
W = berat seismik efektif menurut

METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah pelaksanaan penelitian

1. Mempelajari kajian literatur.
2. Pemodelan struktur awal meliputi:
3. Pemodelan Struktur dengan menambahkan tingkat pada struktur eksisting
4. Evaluasi struktur dengan ETABS
5. Dari hasil evaluasi momen dan geser pada elemen struktur, dapat dilihat elemen struktur mana yang dibutuhkan perkuatan.
6. Analisa perkuatan struktur
7. Pemodelan perkuatan struktur
8. Evaluasi kembali struktur yang sudah diberi perkuatan
9. Hasil

Bagan Alir Penelitian



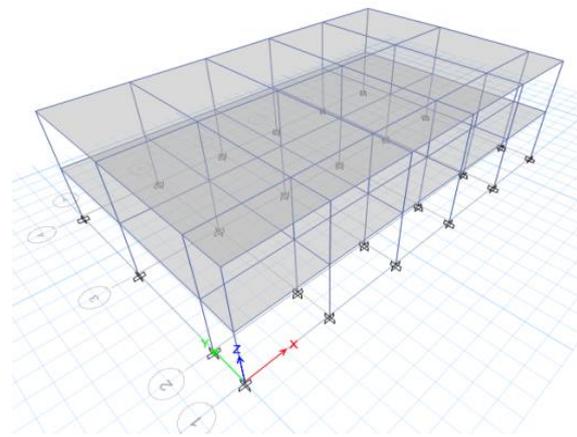
Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Pradesain Struktur Awal

Data Material Struktur

- $f_c = 25 \text{ MPa}$
- $EC = 4700\sqrt{f_c} = 23500 \text{ MPa}$
- Angka poisson = 0.2
- Baja U24 untuk besi tulangan $\phi \leq 12$
 $F_y = 240 \text{ MPa}$
- Baja U40 untuk besi tulangan $D \geq 13$
 $F_y = 400 \text{ MPa}$
- Lokasi bangunan : Manado, Sulawesi Utara
- Jenis tanah = Sedang
- Tinggi tiap lantai = 3.8 m

Model Struktur Awal



Gambar 6. Tampak 3D Model Awal

Beban Mati Sendiri Struktur

Terdiri dari kolom, balok, dan pelat yang sudah dihitung secara otomatis dalam ETABS

Beban Mati Tambahan

Lantai 1

Beban mati tambahan (*Dead load*) pada pelat :

- Keramik = 24 kg/m^2
- Plester (2.5 cm) = 53 kg/m^2
- Beban M/E = 25 kg/m^2
- Beban Plafond = 18 kg/m^2
- Total = 120 kg/m^2

Beban mati pada balok:

- Dinding bata = 250 kg/m^2
- Total = $3.8 \text{ m} - 0.5 \text{ m} \times 250 \text{ kg/m}^2$
= 825 kg/m

Beban mati pada balkon

$$1.2 \text{ m} \times 250 \text{ kg/m}^2 = 300 \text{ kg/m}$$

Lantai 2 (Atap)

Beban mati tambahan (*Dead load*) pada pelat lantai 2 (atap):

- Plester (2.5 cm) = 53 kg/m^2
- Beban M/E = 25 kg/m^2
- Beban Plafond = 18 kg/m^2
- *Waterproofing* = 5 kg/m^2
- Total = 101 kg/m^2

Beban Hidup

- Gedung sekolah = 250 kg/m^2
- Beban atap = 100 kg/m^2
- Faktor reduksi beban hidup untuk gempa = 0.5

Beban Gempa

Perhitungan Beban Gempa berdasarkan SNI 1726:2012 yaitu sebagai berikut:

- Kategori Resiko Bangunan
Gedung sekolah termasuk dalam kategori resiko IV
- Parameter percepatan terpetakan
Untuk kota Manado didapatkan nilai:
 $S_s = 1$ dan $S_1 = 0.4$
- Parameter Spectrum Respon percepatan S_{MS} dan S_{M1}
 $F_a = 1.1$
 $F_v = 1.6$
 $S_{MS} = F_a \cdot S_s = 1.1 \times 1 = 1.1$
 $S_{M1} = F_v \cdot S_1 = 1.6 \times 0.4 = 0.64$
- Parameter percepatan spectral desain SDS dan SD1
 $SD_s = \frac{2}{3} S_{MS} = \frac{2}{3} \cdot 1.5 = 1$
 $SD_1 = \frac{2}{3} S_{M1} = \frac{2}{3} \cdot 0.9 = 0.6$
- Faktor keutamaan gempa
Untuk Kategori resiko IV, $I_e = 1.5$
- Kategori Desain Gempa
Termasuk dalam Kategori Desain Gempa D
- Faktor Modifikasi Respon
Berdasarkan SRPMK, $R = 8$

Analisa Statik Ekuivalen

- Periode Fundamental
 $T_a = C_t \cdot h_n^x$
 $= 0.0466 \times 7.6^{0.9} = 0.289 \text{ detik}$
 $T_{max} = 1.4 \times 0.289 \text{ detik}$
 $= 0.405 \text{ detik}$
- Koefisien Respon Seismic (C_s)

$$C_s = \frac{S_{DS}}{R} = \frac{0.733}{8} = 0.138 \text{ (dan tidak kurang dari } C_{s1} = \frac{0.5 S_1}{(R/I_e)} = 0.04)$$

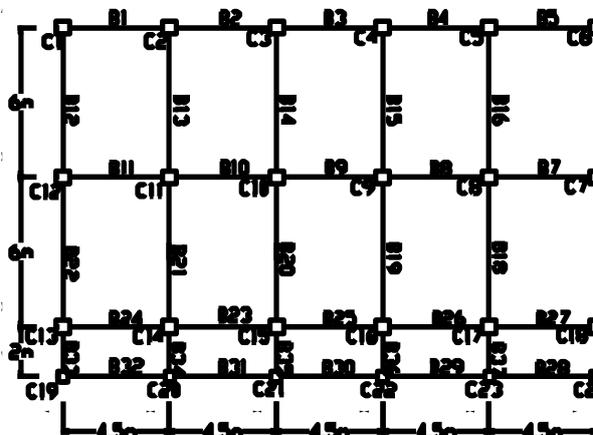
Sehingga, koefisien gaya geser dasar gempa arah X dan Y = 0.138

Kombinasi Pembebanan yang dipakai

1. 1,4D + 1,4 SW
2. 1.2D + 1,2 SW + 1.6L
3. ((1,2 + 0,2 S_{DS})D + (1,2 + 0,2 S_{DS})SW) + ρ.Eqx + L
4. ((1,2 + 0,2 S_{DS})D + (1,2 + 0,2 S_{DS})SW) + ρ.Eqy + L
5. ((0.9 - 0,2 S_{DS})D + (0.9 - 0,2 S_{DS})SW) + ρ.Eqx
6. ((0.9 - 0,2 S_{DS})D + (0.9 - 0,2 S_{DS})SW) + ρ.Eqy

Pradesain Elemen Struktur

Pradesain balok, kolom, dan pelat berdasarkan SNI 2847:2013 dan periode struktur tidak boleh melewati periode struktur maksimum berdasarkan SNI 1726:2012. Pradesain struktur awal dianalisa dan dibantu dengan program ETABS.



Gambar 7. Penamaan Elemen Balok dan Kolom

Ukuran Penampang Balok

Pendimensian awal balok berdasarkan tebal minimum balok non prategang atau pelat satu arah bila lendutan tidak dihitung (SNI 2847:2014), dapat diperbesar apabila melewati periode struktur maksimum

Ukuran Penampang Kolom

Untuk kolom di estimasi berdasarkan $\phi P_n \geq \phi (0.80) [0.85 f'c A_g + A_{st} (f_y - 0.85 f'c)]$ Diambil, $A_s = 0.025 A_g$

Tebal Pelat

Diambil tebal pelat minimum berdasarkan perhitungan Pelat dua arah

Didapat:

- B1-B27 = Balok 30 x 50
- B28-B38 = Balok 20 x40
- C1-C18 = Kolom 30 x 30
- C19-C23 = Kolom 25 x 25
- Tebal pelat lantai 1 = 13 cm
- Tebal pelat atap = 13 cm

Cek periode struktur:

$$T < T_{max} = 0.404 < 0.405 \text{ (Ok)}$$

Penulangan Elemen Struktur

Penulangan Balok

Untuk penampang balok adalah 30 cm x 50 cm, luas tulangan utama balok diketahui otomatis dari program ETABS.

Kuat nominal momen lentur dihitung berdasarkan penampang bertulangan rangkap dengan persamaan:

$$\phi M_n = \phi [C_c (d - \frac{a}{2}) + C_s (d - d')]$$

Dan kuat nominal gaya geser:

$$\phi (V_c + V_s)$$

Dimensi : 30x50	Dimensi : 30x50	Dimensi : 20x40
Daerah : Tumpuan	Daerah : Lapangan	Daerah : Tumpuan dan Lapangan
Tul.memanjang : 8D16	Tul.memanjang : 5D16	Tul.memanjang : 4D13
Tul.senggang : 2P10-200	Tul.senggang : 2P10-200	Tul.senggang : P10-150

Gambar 8. Detail Elemen Struktur Awal Balok

Mu dan Vu didapat dari ETABS

Penampang 30 x 50

1. Daerah Tumpuan

- Mu (tumpuan) = 144.571 KNm
 $\phi M_n > Mu$
207.132 KNm > 144.571 (Ok)
- Vu (tumpuan) = 121.4 KN
 $\phi (V_c + V_s) > Vu$
146.987 KN > 121.4 KN (Ok)

2. Daerah Lapangan

- Mu (lapangan) = 76.554 KNm
 $\phi M_n > Mu$
169.343 KNm > 76.554 KNm (Ok)

- V_u (lapangan) = 120.458 KN
 $\phi(V_c+V_s) > V_u$
 146.987 KN > 120.458 KN (Ok)

Penampang 20 x 40

1. Daerah Tumpuan

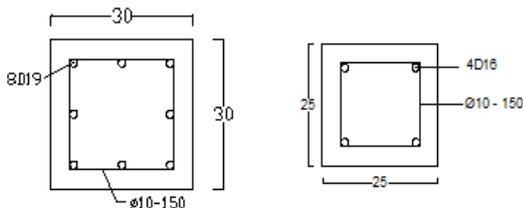
- M_u (tumpuan) = 44.514 KNm
 $\phi M_n > M_u$ (tumpuan)
 44.514 KNm > 71.729 (Ok)
- V_u (tumpuan) = 25.252 KN
 $\phi(V_c+V_s) > V_u$
 76.154 KN > 25.252 KN (Ok)

2. Daerah Lapangan

- M_u (lapangan) = 17.889 KNm
 $\phi M_n > M_u$ (lapangan)
 17.889 KNm > 71.729 (Ok)
- V_u (lapangan) = 45.624 KN
 $\phi(V_c+V_s) > V_u$
 76.154 KN > 45.6242 KN (ok)

Penulangan Kolom

Untuk kolom 30 x 30 diambil $A_s = 0.025A_g$
 dan untuk kolom 20 x 20, $A_s = 0.01A_g$



Gambar 9. Detail Elemen Struktur Awal Kolom

Penulangan Pelat

M_u didapat dari ETABS:

$\phi = 13$ mm

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y}$$

$$\rho_{maks} = 0.75\rho_b$$

$$M_n = A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0.85 \times f'_c \times b}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{7916}{0.9} = 12928.889 \text{ kgm}$$

$$= 12928889 \text{ Nmm}$$

Didapat A_s

Kontrol $A_s \text{ min} = \rho_{min} \times B \times d$

Jika $A_s \text{ min} > A_s$ perlu, digunakan $A_s \text{ min}$

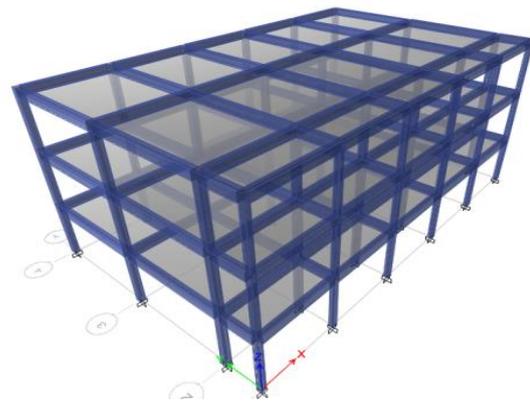
Dipakai: Tulangan pelat lantai Ø10-140

Tulangan pelat atap Ø10-140

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Penambahan Tingkat pada Struktur Awal

Bangunan sekolah dua lantai yang dianggap eksisting seperti yang direncanakan sebelumnya, akan ditambahkan 1 tingkat sehingga struktur menjadi 3 tingkat Untuk tingkat yang ditambahkan (lantai 3) berfungsi sebagai pelat atap, sedangkan untuk lantai 2 yang sebelumnya difungsikan sebagai pelat atap akan difungsikan menjadi pelat lantai. Pelat, balok dan kolom pada lantai 3 sama dengan lantai 2.



Gambar 9. Pemodelan 3D rencana penambahan tingkat

$$T_a = C_t \cdot h_n^x$$

$$= 0.0466 \times 11.4^{0.9}$$

$$= 0.416 \text{ detik}$$

$$T_{max} = C_u \cdot T_a$$

$$= 1.4 \times 0.416 \text{ detik}$$

$$= 0.583 \text{ detik}$$

Evaluasi Struktur Balok

Tabel 7. Hasil Evaluasi Struktur Balok

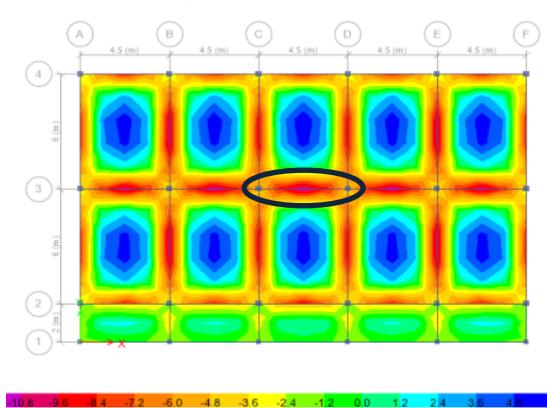
Balok	Balok dengan M_u paling besar	M_u (KNm)	ϕM_n (KNm)	Balok dengan V_u paling besar	V_u (KN)	ϕV_n (KN)	Perkuatan
	B19, B20	167.468	207.132	B14, B15	120.55	146.987	-
	B14, B15	75.89	169.343	B19, B20	129.408	146.987	-
	B35, B36 (Tumpuan)	63.704	71.729	B35, B36 (Lapangan)	67.991	76.154	-

Dari hasil yang didapat, balok masih memenuhi untuk penambahan tingkat

Evaluasi Struktur Pelat

Dievaluasi struktur pelat lantai 2, karena pada struktur awal sebagai pelat atap kemudian difungsikan sebagai pelat lantai.

Hasil evaluasi struktur untuk pelat lantai 2 dapat dilihat pada posisi seperti pada gambar 10 adalah momen *ultimate* yang paling besar. $M_u = 11.407$ kNm yang terdapat pada kombinasi 2.



Gambar 10. Posisi M_u maksimum pada pelat

M_u didapat dari ETABS

Luas tulangan yang terpakai

$$A_s = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times b/S$$

Tinggi blok regangan

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0.85 \times f'_c \times b}$$

$$M_n = A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$\phi M_n > M_u$$

$$12.333 \text{ KNm} > 11.407 \text{ KNm (Ok)}$$

Sehingga pelat masih memenuhi untuk penambahan tingkat

Kolom

Pada analisa struktur, diperlihatkan atau dihitung rasio tegangan (*stress ratio*) dari penampang kolom. Nilai rasio tegangan < 1 menunjukkan kolom tersebut masih mampu menahan beban yang bekerja sedangkan > 1 kolom tidak kuat menahan beban yang direncanakan.

Cek Periode Struktur

$$T > T_{max}$$

$$0.657 \text{ det} > 0.583 \text{ det}$$

Periode struktur akibat perencanaan penambahan lantai/tingkat melebihi periode struktur maksimum. Sehingga elemen struktur perlu diperbesar dan atau perlu menambah jumlah tulangan

Tabel 8. Evaluasi Struktur Kolom yang tidak mampu

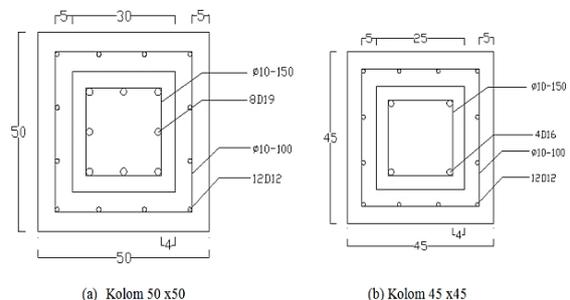
Kolom	Lantai	Kondisi Eksisting		Rasio tegangan	Keterangan
		Ukuran penampang	Tulangan terpasang		
C19	1	25 X 25	4D16	1.196	Kolom tidak mampu
C20	1	25 X 25	4D16	1.092	Kolom tidak mampu
C21	1	25 X 25	4D16	1.129	Kolom tidak mampu
C22	1	25 X 25	4D16	1.129	Kolom tidak mampu
C23	1	25 X 25	4D16	1.092	Kolom tidak mampu
C24	1	25 X 25	4D16	1.196	Kolom tidak mampu
C11	1	30 X 30	8D19	1.028	Kolom tidak mampu
C10	1	30 X 30	8D19	1.040	Kolom tidak mampu
C9	1	30 X 30	8D19	1.051	Kolom tidak mampu
C8	1	30 X 30	8D19	0.989	Kolom kritis
C2	1	30 X 30	8D19	0.988	Kolom kritis
C3	1	30 X 30	8D19	1.047	Kolom tidak mampu
C3	2	30 X 30	8D19	1.013	Kolom tidak mampu
C4	1	30 X 30	8D19	1.047	Kolom tidak mampu
C4	2	30 X 30	8D19	1.013	Kolom tidak mampu
C5	1	30 X 30	8D19	0.973	Kolom kritis

Analisa Perkuatan Struktur

Pemodelan kolom dengan *Concrete Jacketing* menggunakan spesifikasi minimum berdasarkan dokumen CED 39 (7428) "*Seismic Evaluation and Strengthening of Existing Reinforced Concrete Buildings – Guidelines*" dan memperhatikan syarat SNI 2847:2013

- Mutu beton pembungkus = 25 MPa
- Tulangan longitudinal tambahan diberikan tulangan 12D12
- Tulangan sengkang Ø10-100
- Tebal *jacketing* 100 mm

Kolom 30 x 30 ditambahkan tulangan minimum dan penampang diperbesar menjadi 50 x 50 dan kolom 25 x 25 diperbesar menjadi 45 x 45



Gambar 11. Kolom Eksisting yang di *Jacketing*

Pemodelan 1

Tabel 9. Pemodelan 1 analisa *Concrete Jacketing*

Kolom	Lantai	Kondisi Eksisting		Perkuatan		Rasio Tegangan	Keterangan	Periode struktur
		Ukuran penampang	Tulangan terpasang	Ukuran penampang diperbesar	Tulangan yang ditambahkan			
C19	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	45 x 45	12D12, Ø10-100	0.866	Kolom mampu	T > T max 0.604 < 0.583 (tidak ok)
C20	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	45 x 45	12D12, Ø10-100	0.748	Kolom mampu	
C21	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.943	Kolom mampu	
C22	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.943	Kolom mampu	
C23	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.748	Kolom mampu	
C24	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.866	Kolom mampu	
C11	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.691	Kolom mampu	
C10	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.349	Kolom mampu	
C9	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.342	Kolom mampu	
C8	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.645	Kolom mampu	
C2	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.756	Kolom mampu	
C3	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.727	Kolom mampu	
C5	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.922	Kolom mampu	
C4	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.727	Kolom mampu	
C4	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.922	Kolom mampu	
C5	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.739	Kolom mampu	
C2	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	1.017	Kolom tidak mampu	

Balok	Keterangan
B35	Gagal geser
B36	Gagal geser

Pemodelan 2

Tabel 10. Pemodelan 2 analisa *Concrete Jacketing*

Kolom	Lantai	Kondisi Eksisting		Perkuatan		Rasio Tegangan	Keterangan	Periode struktur
		Ukuran penampang	Tulangan terpasang	Ukuran penampang diperbesar	Tulangan yang ditambahkan			
C19	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.585	Kolom mampu	T < T max 0.587 < 0.583 (ok)
C20	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.54	Kolom mampu	
C21	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.484	Kolom mampu	
C22	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.484	Kolom mampu	
C23	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.54	Kolom mampu	
C24	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.585	Kolom mampu	
C11	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.643	Kolom mampu	
C10	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.591	Kolom mampu	
C9	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.595	Kolom mampu	
C8	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.579	Kolom mampu	
C2	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.689	Kolom mampu	
C3	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.59	Kolom mampu	
C3	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.949	Kolom mampu	
C4	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.59	Kolom mampu	
C4	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.949	Kolom mampu	
C5	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.689	Kolom mampu	

Pemodelan 3

Tabel 11. Pemodelan 3 analisa *Concrete Jacketing*

Kolom	Lantai	Kondisi Eksisting		Perkuatan		Rasio Tegangan	Keterangan	Periode struktur
		Ukuran penampang	Tulangan terpasang	Ukuran penampang diperbesar	Tulangan yang ditambahkan			
C19	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.66	Kolom mampu	T < T max 0.587 < 0.583 (ok)
C20	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.531	Kolom mampu	
C21	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.537	Kolom mampu	
C22	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.557	Kolom mampu	
C23	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.531	Kolom mampu	
C24	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.66	Kolom mampu	
C11	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.624	Kolom mampu	
C10	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.611	Kolom mampu	
C9	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.615	Kolom mampu	
C8	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.574	Kolom mampu	
C2	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.706	Kolom mampu	
C3	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.529	Kolom mampu	
C3	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.459	Kolom mampu	
C4	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.529	Kolom mampu	
C4	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.447	Kolom mampu	
C5	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.706	Kolom mampu	

Pemodelan 4

Tabel 12. Pemodelan 4 analisa *Concrete Jacketing*

Kolom	Lantai	Kondisi Eksisting		Perkuatan		Rasio Tegangan	Keterangan	Periode struktur
		Ukuran penampang	Tulangan terpasang	Ukuran penampang diperbesar	Tulangan yang ditambahkan			
C19	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.763	Kolom mampu	T < T max 0.583 < 0.583 (ok)
C20	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.633	Kolom mampu	
C21	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.659	Kolom mampu	
C22	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.659	Kolom mampu	
C23	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.633	Kolom mampu	
C24	1	25 X 25	4D16, Ø10-150	-	-	0.763	Kolom mampu	
C11	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.668	Kolom mampu	
C10	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.673	Kolom mampu	
C9	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.679	Kolom mampu	
C8	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	50 x 50	12D12, Ø10-100	0.639	Kolom mampu	
C2	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.786	Kolom mampu	
C3	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.917	Kolom mampu	
C3	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.915	Kolom mampu	
C4	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.917	Kolom mampu	
C4	2	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.915	Kolom mampu	
C5	1	30 X 30	8D19, Ø10-150	-	-	0.786	Kolom mampu	

Pemodelan 2, 3, dan 4 direkomendasi untuk perkuatan kolom pada struktur awal, dimana setelah dianalisis dengan bantuan program

ETABS seluruh elemen struktur mampu menerima penambahan tingkat dan periode struktur tidak melebihi periode maksimum yang disyaratkan. Pemodelan 4 merupakan struktur yang lebih ekonomis dan aman, *jacketing* hanya dilakukan pada kolom C8, C9, C10, dan C11, setiap elemen struktur mampu untuk menerima perencanaan penambahan tingkat.

PENUTUP

Kesimpulan

Dari hasil evaluasi struktur dan analisis perkuatan bangunan dengan bantuan program ETABS, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Balok dan pelat masih memenuhi untuk perencanaan penambahan 1 tingkat
2. Dari hasil evaluasi struktur, terdapat beberapa kolom yang memiliki rasio tegangan > 1 yaitu kolom C19, C20, C21, C22, C23, C24, C11, C10, C9, C3 pada lantai 1 dan lantai 2, C4 pada lantai 1 dan 2. C8, C2, dan C5 juga mendekati 1, sehingga diperlukan perkuatan kolom pada struktur awal.
3. Periode struktur akibat penambahan tingkat bangunan lebih besar dari periode maksimum struktur berdasarkan SNI 1726-2012.

4. Rekomendasi perkuatan dengan metode *Concrete Jacketing* pada pemodelan 4, kolom C8, C9, C10, dan C11 yang diperbesar menjadi 50 x 50 dengan tambahan tulangan memanjang 12D12 dan tulangan sengkang Ø10-100, sehingga struktur dapat menerima penambahan tingkat yang direncanakan serta periode struktur kurang dari periode struktur maksimum.

Saran

1. Memperhatikan distribusi beban untuk kolom yang akan diperbesar
2. Diperlukan ketelitian pada saat melakukan pemodelan dan analisa struktur pada ETABS.
3. Mempunyai data *real* di lapangan, agar dapat diketahui kondisi bangunan/struktur di lapangan sehingga dapat direkomendasi perkuatan bangunan yang cocok pada pelaksanaannya.
4. Untuk kasus-kasus lain, bisa digunakan jenis-jenis perkuatan struktur sesuai dengan kebutuhan untuk penambahan jumlah tingkat atau perubahan fungsi bangunan misalnya.
5. Dapat meninjau pondasi dan anggaran biaya.
6. Menambah referensi untuk spesifikasi perkuatan struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. 1989. *Tata Cara Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (SNI 03-1727-1989)*. Bandung.
- Badan Standarisasi Nasional. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung (SNI 1726:2012)*. Bandung.
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2013)*. Bandung
- Draft Indian Standard, 2010. *CED 39 (7428) Seismic Evaluation and Strengthening of Existing Reinforced Concrete Buildings – Guidelines*
- Edward G. Nawy, Tavid, Benny Kusuma, 2010, “*Beton Bertulang: Sebuah Pendekatan Mendasar Edisi Kelima*”, ITS Press, Surabaya
- Jacks C. McCormac, 2004, “*Edisi Kelima Desain Beton Bertulang Jilid 2*”, Erlangga, Jakarta
- Muhammad Miftakhur Riza, “*EBOOK Seri 1 APLIKASI PERENCANAAN STRUKTUR GEDUNG DENGAN ETABS*”, ARS GROUP