

INVESTIGASI KERUSAKAN DAN ANALISA KEANDALAN STRUKTUR ATAS GEDUNG PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS WIRALODRA

Wachid Hasyim

Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Wiralodra, Indramayu

E-mail: wachidhasyim@unwir.ac.id

ABSTRACT

Library building University Wiralodra has been used for eight years since 2006, suffered some damage in some part. Damage Happens on dominated by architectural damage some part of the building. Singer study aims to etermine the volume defect review Happens And Structural Componen reliability index value at Existing Condition.

The study was conducted with Stages Volume Measurement Component Structure damage and power on Existing Condition. Strong material component measurlllement Structure And Decline Happens on Foundations of buildings are analyzed to determine value detainee review e Structure And Effect. Structural Components detainees value obtained from statistical value of Capacity with strong material factors, factors of fabrication, and professional factors. Values obtained from the amount of the Securities loads And statistical parameter value from each which work. The index of reliability is calculated Operates analytical (FOSM) with Counting functions costs kos between Prisoners and load on Conditions Limit of ultimate, while the index of reliability with a Monte Carlo simulation is calculated based on the average value and standard deviation From the curve Relations between Prisoners and load hearts Conditions strong Limits experiments were using a number of sample.

Results The measurements showed that the volume of non-structurally damage occurred Largest sliding doors Main on the damage 66.67% Largest Structural damage occurred while AT Column K2 by 25% exfoliating specific form of damage. on smallest reliability index axial Conditions Scroll And Flexible And Conditions Happened Column K3 on the value of 0.41 and 2.95, while AT beam obtained value less than 0.

Keywords: *Volume damage, reliability index, Monte Carlo Simulation, Calibration partial security factor (PSF).*

ABSTRAK

Bangunan gedung Perpustakaan Universitas Wiralodra yang telah digunakan selama 8 tahun sejak tahun 2006, mengalami beberapa kerusakan di beberapa bagian. Kerusakan yang terjadi didominasi oleh kerusakan arsitektural pada beberapa bagian gedung. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui volume kerusakan yang terjadi dan nilai indek reliabilitas komponen struktur pada kondisi eksisting.

Tahapan penelitian dilakukan dengan pengukuran volume kerusakan dan kekuatan komponen struktur pada kondisi eksisting. Pengukuran kuat material komponen struktur dan penurunan yang terjadi pada pondasi gedung dianalisis untuk mengetahui nilai tahanan dan efek beban struktur. Nilai tahanan komponen struktur didapatkan dari kapasitas dengan nilai statistik dari faktor kuat material, faktor fabrikasi, dan faktor profesional. Nilai beban didapatkan dari besaran efek beban dan nilai parameter statistik dari masing-masing beban yang bekerja. Indek reliabilitas dihitung secara analitis (FOSM) dengan menghitung fungsi kinerja antara tahanan dan beban pada kondisi batas ultimit, sedangkan indek reliabilitas dengan simulasi Monte Carlo dihitung berdasarkan nilai rata-rata dan simpangan baku dari kurva hubungan antara tahanan dan beban dalam kondisi kuat batas yang menggunakan sejumlah sampel percobaan.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa volume kerusakan non struktural terbesar terjadi pada pintu geser utama dengan kerusakan sebesar 66.67% sedangkan kerusakan struktural terbesar terjadi pada kolom K2 sebesar 25% berupa kerusakan pengelupasan spesi. Indek reliabilitas terkecil pada kondisi aksial dan lentur serta kondisi geser terjadi pada kolom K3 dengan nilai sebesar 0,41 dan 2,95, sedangkan pada balok didapatkan nilai kurang dari 0.

Kata kunci: *Volume kerusakan, indek reliabilitas, simulasi Monte Carlo, kalibrasi faktor keamanan parsial (PSF).*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Gedung Perpustakaan Universitas Wiralodra Indramayu dibangun dengan biaya bantuan Pemerintah Daerah Indramayu dengan maksud untuk memfasilitasi kebutuhan sarana belajar yang belum memadai. Gedung tersebut menggunakan struktur rangka beton bertulang dengan 2 lantai bertingkat. Selama masa pelayanan, gedung tersebut difungsikan sebagai gedung perpustakaan di lantai 2 dan unit perkantoran di lantai 1 serta sebagian di lantai 2.

Kondisi komponen struktur gedung saat ini telah mengalami beberapa kerusakan. Kerusakan terjadi pada komponen struktural maupun non struktural. Keretakan dan kerusakan pada komponen gedung perlu ditangani secara khusus supaya gedung tetap dapat digunakan sesuai fungsinya.

Kondisi struktur gedung secara keseluruhan harus dapat menjamin keselamatan dan kenyamanan pengguna. Struktur gedung dengan komponen yang mengalami kerusakan harus dapat diketahui pengaruh terhadap keamanannya. Dari uraian tersebut maka diperlukan penelitian tentang penilaian kerusakan dan analisa reliabilitas struktur atas pada Gedung Perpustakaan Universitas Wiralodra Indramayu.

Penelitian dilakukan terhadap kondisi eksisting untuk mengetahui volume kerusakan dan nilai indek reliabilitas komponen struktur bangunan gedung Perpustakaan Universitas Wiralodra.

TINJAUAN PUSTAKA

Penilaian kerusakan

Menurut Watt (2007), Kerusakan merupakan kegagalan atau kelemahan dalam fungsi, kinerja, atau persyaratan penggunaan bangunan.

Menurut Uzarsky (2006), Besar kerusakan pada bangunan gedung terhadap tingkat bahaya yang ditimbulkan dapat diperhitungkan dengan menggunakan pembobotan kerusakan pada masing-masing komponen atau subkomponen. Bobot kerusakan dapat dihitung dengan persamaan 2.1, sebagai berikut :

$$\text{Bobot} = \frac{A}{B} \times 100 \%$$

Dimana :

A = besar kerusakan menurut kuantitas (luas, panjang dan unit)

B = total kuantitas (luas, panjang, dan unit)

Analisa reliabilitas struktur

Reliabilitas struktur didasarkan pengukuran pada indek reliabilitas dan probabilitas kegagalan. Struktur akan dianggap tidak reliabel jika kondisi batas kegagalan struktur melebihi nilai yang diminta. Aspek yang dipertimbangkan dalam memperhitungkan indek reliabilitas adalah fungsi kuat batas ultimit yang memperhitungkan variabel-variabel efek beban dan tahanan yang bersifat acak.

Variabel-variabel beban dan tahanan memiliki distribusi tertentu sehingga variabel beban dan tahanan dapat dikelompokkan menurut nilai rerata dan simpangan baku. Metode perhitungan dengan mempertimbangkan nilai statistik variabel disebut dengan metode analitis atau derajat pertama-moment kedua (*First Order Second Moment*). Selain itu metode perhitungan menggunakan simulasi dapat digunakan untuk menganalisa hubungan variabel statistik diantaranya yaitu metode simulasi *Monte Carlo*.

Fungsi kuat batas (*limit state function*)

Definisi kegagalan pada konsep probabilitas ditentukan sebagai kondisi dimana struktur tidak dapat mencapai suatu target dalam fungsi kinerja (*performance function*). fungsi kondisi batas ultimit berupa tahanan (R) dan beban (S) secara matematis didefinisikan seperti berikut.

$$g(Z) = R - S = 0$$

Fungsi kondisi batas dalam 3 kondisi dapat dinyatakan sebagai berikut:

- kondisi aman (*safe*), jika Nilai $g(Z) > 0$.
- kondisi batas, jika $g(Z) = 0$.
- kondisi gagal (*failure*), jika $g(Z) < 0$.

Indek reliabilitas dan probabilitas kegagalan

Indek reliabilitas dengan distribusi data berbentuk normal pada kondisi kuat batas secara analitis (FOSM) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

Dimana :
 μ_R dan μ_S = rata-rata untuk tahanan dan efek beban
 σ_R dan σ_S = simpangan baku tahanan dan efek beban

Besaran probabilitas kegagalan dalam hubungan dengan indek reliabilitas dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$Pf = \Phi[-\beta]$$

Sehingga indek reliabilitas dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\beta = -\Phi^{-1}[Pf]$$

dimana :
 Pf = probabilitas kegagalan
 β = indek reliabilitas
 Φ = fungsi distribusi probabilitas kumulatif (CDF)
 ϕ = fungsi distribusi kepadatan (PDF)

Simulasi Monte Carlo

Simulasi *Monte Carlo* merupakan metode pengambilan sampel acak yang didapatkan dari bangkitan nilai acak dengan faktor ketidakpastian. Nilai variabel acak dibangkitkan dari parameter-parameter statistik variabel beban dan tahanan. Nilai indek reliabilitas didapatkan dengan menghitung probabilitas kegagalan dari simulasi.

Probabilitas kegagalan ditentukan dengan menghitung jumlah sampel yang tidak memenuhi persyaratan dari jumlah sampel secara keseluruhan. Probabilitas kegagalan dihitung menurut persamaan berikut.

$$P_f = \frac{N_i}{N_{total}}$$

Dimana :
 N_i = jumlah sampel gagal
 N_{total} = jumlah sampel keseluruhan

Prosedur pengambilan sampel dalam simulasi *Monte Carlo* dapat dilakukan dengan *pseudo random generation* dimana sampel terdistribusi secara ragam antara 0 dan 1 untuk menghasilkan angka acak.

Angka acak dari distribusi data dihitung untuk mendapatkan nilai sampel yang dibangkitkan dengan metode sampling. Metode sampling nilai acak dapat menggunakan metode transformasi kebalikan, yaitu seperti berikut.

$$f_x(x_i) = U_i \text{ atau } x_i = F_x^{-1}(u_i)$$

Nilai probabilitas distribusi kepadatan kumulatif (CDF) dapat dihitung dengan persamaan:

$$\Phi(z) = 1 - \Phi(-z) = \int_{-\infty}^z \varphi(z) dz$$

Dimana nilai probabilitas distribusi kepadatan (PDF) dengan persamaan:

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}(z)^2\right]$$

Sehingga nilai z dapat dihitung dengan nilai invers dari angka acak p seperti berikut.

$$z = \Phi^{-1}(p) = -t + \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}$$

Dimana nilai t dapat dihitung seperti berikut.
 $t = \sqrt{-\ln(p^2)}$

Nilai $C_0, C_1, C_2, d_1, d_2, d_3$ masing-masing adalah 2.515517, 0.802853, 0.010328, 0.189269, 0.001308.

Nilai z untuk $p > 0$ dihitung seperti berikut.

$$z = -\Phi^{-1}(p^*)$$

Dengan p^*
 $p^* = 1 - p$

Nilai invers menurut Allen, et al (2005), nilai invers CDF dapat dihitung dengan fungsi Norminv di spreadsheet.

Indek Reliabilitas Target

Pada struktur eksisting, nilai indek reliabilitas target diperbolehkan lebih rendah dengan alasan ekonomis. Nilai indek reliabilitas target menurut tingkat kepentingan, untuk struktur gedung baru, struktur eksisting, dan struktur bernilai historis dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Indeks reliabilitas target

Tingkat kepentingan	Desain baru	Eksisting	Historis
Rendah	3.00 - 3.50	2.00 - 2.50	3.25 - 3.50
Sedang	3.50 - 4.00	2.50 - 3.00	3.50 - 4.50
Tinggi	3.75 - 4.50	2.75 - 3.50	3.75 - 4.75

Variabel Tahanan

Untuk mendapatkan nilai variabel statistik tahanan, lebih dahulu perhitungan kapasitas atau kuat ultimit dari komponen struktur didapatkan dengan proses analisis secara deterministik.

$$\mu_R = \lambda_R \times R_n$$

$$\lambda_R = \lambda_M \times \lambda_F \times \lambda_P$$

$$\lambda_M = \sqrt{\lambda_{fc} \times \lambda_{fy}}$$

$$\lambda_F = \sqrt{\lambda_d \times \lambda_{As} \times \lambda_\phi}$$

Dimana:

- λ_R = faktor bias untuk tahanan
- λ_M = faktor bias untuk faktor material
- λ_F = faktor bias untuk faktor fabrikasi
- λ_P = faktor bias untuk faktor profesional

$$V_R = \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + V_P^2}$$

$$V_M = \sqrt{V_{fc}^2 + V_{fy}^2}$$

$$V_F = \sqrt{V_d^2 + V_{As}^2 + V_\phi^2}$$

Dimana:

- VR = koefesien variasi untuk tahanan
- VM = koefesien variasi untuk faktor material
- VF = koefesien variasi untuk faktor fabrikasi
- VP = koefesien variasi untuk faktor profesional

Nilai simpangan baku dari komponen struktur dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\sigma_R = \mu_R \cdot V_R$$

Nilai λ dan V dari faktor profesional dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Nilai λ dan V faktor profesional

Komponen	λ	V
Balok beton-Lentur	1.02	0.06
Balok beton-geser tanpa	1.16	0.11
Balok beton-geser dengan	1.075	0.1
Kolom aksial, sengkang	1	0.08
Kolom aksial, spiral	1.05	0.06
Plat satu arah-Lentur	1.02	0.06
Plat satu arah-Geser	1.16	0.11
Plat dua arah-Geser	1.16	0.11
Kuat tumpu	1.02	0.06

Variabel Efek Beban

Nilai efek pembebanan didapatkan dari kombinasi beban mati dan beban hidup seperti yang dikemukakan Galambos sebagai berikut.

$$\mu_S = \lambda_D D + \lambda_L L$$

Sedangkan koefesien variasi untuk variabel beban menurut Galambos and Yu (1984), dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$V_S = \frac{\sqrt{(V_D D)^2 + (V_L L)^2}}{\mu_S}$$

Sedangkan faktor bias untuk beban dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Faktor bias (λ) beban

Beban	Faktor bias (λ)	Koefesien variasi (V)
Mati	1.05	0.1
Hidup	1	0.18

Nilai simpangan baku dari beban dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\sigma_S = \mu_S \cdot V_S$$

Dimana :

- σ_S = simpangan baku efek beban
- μ_S = rata-rata untuk beban
- VS = koefesien variasi untuk beban

Kalibrasi faktor keamanan partial (*partial safety factor calibration*)

Nilai faktor tahanan dengan data berdistribusi normal dapat dihitung seperti berikut.

$$\phi = (1 - \chi \cdot \beta \cdot V_R) \cdot \lambda_R$$

Dimana:

$$\chi = \frac{\sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_L^2}}{\sigma_D + \sigma_L}$$

Sedangkan nilai faktor beban dengan data berdistribusi normal pada beban mati dan beban hidup dapat dihitung seperti berikut.

$$\gamma_D = 1 + \frac{\mu_R - \mu_S}{\sigma_R + \sigma_S} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_L^2}}{\sigma_D + \sigma_L} \cdot V_D$$

$$\gamma_L = 1 + \frac{\mu_R - \mu_S}{\sigma_R + \sigma_S} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_L^2}}{\sigma_D + \sigma_L} \cdot V_L$$

Dimana:

- λ_R = faktor bias tahanan
- β = indek reliabilitas
- χ = koefisien korelasi
- μ_R = rata-rata untuk tahanan
- σ_R = simpangan baku tahanan
- μ_S = rata-rata untuk efek beban
- σ_S = simpangan baku efek beban
- μ_D = rata-rata untuk efek beban mati
- σ_D = simpangan baku efek beban mati
- μ_L = rata-rata untuk efek beban hidup
- σ_L = simpangan baku efek beban hidup
- V_D = koefisien variasi beban mati
- V_L = koefisien variasi beban hidup

Reliabilitas Kolom dengan beban aksial dan lentur

Nilai tahanan kolom dapat dihitung menurut persamaan berikut.

$$R = \sqrt{P^2 + \left(\frac{M}{h}\right)^2}$$

Dimana:

- P = gaya aksial kolom
- M = gaya lentur kolom
- h = tinggi penampang kolom

Reliabilitas Kolom dengan beban geser

Tahanan geser kolom yang terjadi dapat dihitung menurut persamaan berikut.

$$V_C = \left(1 + \frac{N_u}{14A_g}\right) \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6}\right) b_w d$$

Dimana :

- V_C = gaya geser nominal
- N_u = gaya aksial

- f'_c = kuat tekan beton
- b_w = lebar penampang kolom
- d = tinggi efektif penampang

Reliabilitas Komponen Lentur balok

Tahanan lentur komponen balok dapat dihitung menurut persamaan berikut :

$$R_n = A_s \cdot f_y \cdot d \left(1 - \frac{A_s \cdot f_y}{1,7 \cdot f'_c \cdot b \cdot d}\right)$$

Dimana:

- A_s = luas tulangan
- f_y = kuat leleh tulangan
- f'_c = kuat tekan beton
- b = lebar penampang
- d = tinggi penampang efektif

Reliabilitas komponen geser balok

Tahanan geser komponen balok dapat dihitung menurut persamaan berikut.

$$V_u = V_c + V_s$$

$$V_n = 0,8 V_u$$

$$V_c = \left(\frac{1}{6} \sqrt{f'_c}\right) b_w d$$

$$V_s = A_v f_y \frac{d}{s}$$

$$A_v = \frac{b_w s}{3f_y}$$

Dimana :

- V_u = gaya geser balok
- V_n = tahanan geser balok
- V_c = tahanan geser balok beton
- V_s = tahanan geser tulangan
- b_w = lebar penampang balok
- f'_y = kuat leleh tulangan
- f'_c = kuat tekan beton
- A_s = luas tulangan tarik
- A_s' = luas tulangan tekan
- d = jarak tepi ke tulangan tarik
- d_l = jari tepi tekan ke tulangan tarik
- ρ' = rasio tulangan tekan
- A_v = luas tulangan geser minimum
- S = jarak antara tulangan geser

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian sebagai bahan kajian penelitian berupa bangunan Gedung Perpustakaan Universitas Wiralodra Indramayu yang terletak di Jalan Ir.H.Juanda

Km.3 Kabupaten Indramayu.

Alur penelitian

Dalam rangka mengukur volume kerusakan dan analisa reliabilitas dilakukan beberapa tahapan kegiatan sebagai berikut :

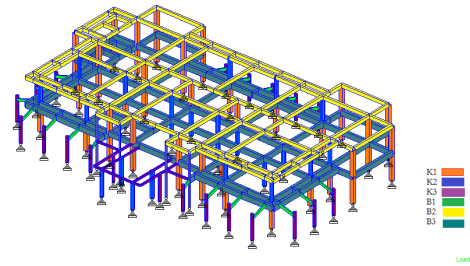
1. Pengamatan visual pada kerusakan bangunan (*visual check*). Hasil dari kegiatan berupa jumlah dan bobot kerusakan tersebut.
2. Pengukuran geometri komponen struktur, kegiatan ini berupa pengukuran langsung pada dimensi komponen dan jumlah tulangan terpasang.
3. Pengukuran penurunan/beda tinggi pondasi/kolom.
4. Pengujian mutu bahan beton, pengujian dilakukan dengan cara non destruktif yaitu dengan uji hammer test.
5. Analisa struktur kondisi awal untuk mencari gaya-gaya dalam struktur.
6. Analisa struktur pada kondisi eksisting untuk mencari gaya-gaya dalam struktur.
7. Membandingkan gaya-gaya dalam struktur dan menyeleksi komponen struktur yang memiliki kenaikan gaya dalam ekstrim.
8. Analisa reliabilitas komponen struktur kondisi eksisting.
9. Analisa faktor keamanan parsial atau *partial safety factor (PSF)*

Pemodelan struktur

Pemodelan struktur bertujuan untuk mendapatkan gaya-gaya dalam struktur pada kondisi eksisting, pemodelan dilakukan dengan tahapan sebagai berikut :

1. Pemodelan struktur 3 dimensi dilakukan dengan program bantu *Staad pro v.8i*.
2. Elemen balok dan kolom dimodelkan sebagai element frame.
3. Beban plat dihitung sebagai beban lantai yang bekerja pada balok pendukung.
4. Beban atap dilimpahkan sebagai beban titik pada ring balk.
5. Dinding batu bata dimodelkan sebagai beban merata pada balok.
6. Penurunan pada pondasi hasil pengukuran dimodelkan sebagai beban tumpuan (*support displacement load*).

Adapun model struktur gedung perpustakaan seperti pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Model struktur gedung perpustakaan

Analisa reliabilitas

Analisa reliabilitas bertujuan untuk mendapatkan nilai indeks reliabilitas dan probabilitas kegagalan, analisa dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

1. Kuat ultimit komponen struktur, analisa kuat ultimit pada komponen struktur dihitung berdasarkan jenis kegagalan yang dipertimbangkan akan terjadi pada struktur, yaitu :

a. Kegagalan pada kolom

Kuat ultimit komponen kolom dipertimbangkan terhadap kegagalan yang mungkin terjadi akibat gaya tekan dan momen serta gaya geser.

b. Kegagalan pada balok

Kuat ultimit komponen balok dipertimbangkan terhadap kegagalan yang mungkin terjadi akibat gaya lentur dan gaya geser.

2. Data efek beban,

Data didapatkan dari hasil analisa struktur menggunakan software bantu *Staad pro v.8i* dengan data beban yang digunakan berupa gaya aksial, geser, dan momen.

3. Faktor bias dan koefisien variasi

Faktor bias (λ) merupakan perbandingan nilai nominal dengan nilai rerata variabel. Faktor bias menunjukkan jarak antara nilai pengukuran terhadap nilai statistik variabel dari data. Sedangkan koefisien variasi (V) merupakan perbandingan nilai simpangan baku dengan nilai rerata variabel. Koefisien variasi menunjukkan seberapa besar homogenitas data yang dihitung secara statistik.

Besaran faktor bias dan koefisien variasi dari variabel tahanan dipengaruhi oleh nilai faktor bias dari masing-masing faktor yang mempengaruhi seperti: faktor material, faktor fabrikasi, dan faktor profesional.

4. Perhitungan Indek reliabilitas (β)

Perhitungan dilakukan dengan cara analitis (FOSM) dan simulasi *Monte Carlo*. Analisa

dilakukan dengan menghitung hubungan tahanan dan beban pada kondisi batas ultimit (*limit state function*) atau fungsi kinerja. Prosedur simulasi *Monte Carlo* adalah sebagai berikut :

- a. Menentukan jenis distribusi,

Distribusi data dengan model fungsi kuat batas dimodelkan sebagai fungsi dengan jenis distribusi data sesuai dengan model tahanan dan beban.

- b. Bangkitan sampel acak dari distribusi data,

Salahsatu metode bangkitan nilai acak dari sebuah variabel adalah metode transformasi kebalikan. Nilai bangkitan angka acak untuk variabel tahanan dan beban dilakukan dengan menggunakan software bantu *Oracle Crystal Ball*.

- c. Simulasi fungsi kuat ultimit

Simulasi dilakukan dengan membangkitkan nilai acak antara 0 dan 1 untuk mendapatkan sampel di Microsoft Excel dengan Add In *Oracle Crystal Ball*.

- d. Nilai indeks reliabilitas dan probabilitas kegagalan

Nilai probabilitas kegagalan (Pf) dihitung berdasarkan jumlah kegagalan berbanding jumlah simulasi. Nilai indek reliabilitas komponen kurang dari nol ($\beta < 0$), menunjukkan bahwa beban yang bekerja memiliki nilai yang jauh lebih besar dari nilai kapasitasnya ($\mu R - \mu S < 0$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data komponen struktur

Properti elemen berupa dimensi balok, kolom, dan juga elevasi masing-masing lantai bangunan. Dimensi komponen struktur yang digunakan sebagai masukan data pemodelan seperti ditunjukkan tabel 4 berikut.

Tabel 4. Dimensi komponen struktur

No	Kolom	b (m)	h (m)	Diameter (m)	Keterangan
1	K1	0,40	0,40		Kolom
2	K2	-		0,45	Kolom
3	K3		-	0,35	Kolom
4	B1	0,15	0,20	-	Balok
5	B2	0,25	0,40	-	Balok
6	B3	0,30	0,60	-	Balok

Kuat tekan beton

Hasil pengukuran kuat tekan beton pada kolom K1, K2, dan K3 dengan *Hammer Test* dapat dilihat pada tabel 5 berikut.

Tabel 5. Kuat tekan beton pada kolom

Komponen	Lantai	Kuat tekan (f _c)	
		Rata-rata (μ) (Mpa)	Simpangan baku (σ) (Mpa)
Kolom K1	1	23.52	1.4
Kolom K1	2	23.62	1.44
Kolom K2	1	23.03	1.65
Kolom K2	2	22.9	1.34
Kolom K3	1	17.08	4.27

Sedangkan nilai kuat tekan rata-rata beton untuk balok di lantai 1 dan 2 dapat dilihat pada tabel 6 berikut.

Tabel 6. Kuat tekan beton pada balok

Komponen	Lantai	Kuat tekan (f _c)	
		Rata-rata (μ) (Mpa)	Simpangan baku (σ) (Mpa)
Balok B1	1	18.8	0.46
Balok B2	2	22.73	0.56
Balok B3	1	23.1	0.37

Kuat leleh tulangan baja

Nilai kuat leleh dan tarik tulangan baja dapat dilihat pada tabel 7 berikut.

Tabel 7. Kuat leleh tulangan baja

No. Test	Identifikasi Benda Uji	Diameter	
		Aktual (mm)	Nominal (mm)
1	Bj Ulir	13.99	16
2	Bj Ulir	18.17	19

Volume kerusakan

Kerusakan yang terjadi pada gedung berupa kerusakan non struktural dan struktural. Kerusakan yang terjadi dapat dilihat pada tabel 8 dan 9 berikut.

Tabel 8. Foto Kerusakan non struktural

No	Foto	Kerusakan	Keterangan
1		Rusak	Pintu utama macet/rusak dan tidak bisa dioperasikan
2		Rusak	Kaca pintu akses retak

Sedangkan kerusakan struktural dapat dilihat pada tabel 9 berikut.

Tabel 9. Foto Kerusakan struktural

No	Foto	Kerusakan	Keterangan
1		Rusak	Pengelupasan spesi kolom
2		Rusak	Pengelupasan spesi pada balok

Volume kerusakan struktur berdasarkan perhitungan, dapat dilihat pada tabel 10 berikut.

Tabel 10. Volume Kerusakan

No	Komponen	Volume kerusakan total	Keterangan
1	K1L1	10.34%	
2	K2L1	25%	
3	K3	25%	
4	B1	14%	
5	Dinding Dalam	14%	
6	Dinding Luar	19%	
		3%	
		2%	
		3%	
		2%	
		3%	
		2%	
		3%	
		3%	
7	Keramik	0.04%	
		0.03%	
		0.00%	
8	Plafond KM	32.00%	
		22.22%	
		54.00%	
		6.25%	
9	Jendela	1.41%	
10	Pintu Geser kaca	66.67%	
11	Pintu Dorong 2 kaca	13.33%	
12	Pintu PVC	100.00%	

Penurunan pondasi

Penurunan yang terjadi pada tanah dasar diidealisasikan sebagai beban tambahan pada struktur dengan mengganggu struktur bangunan tetap tanpa terjadi penurunan. Penurunan yang terjadi dapat dilihat pada tabel 11 berikut.

Tabel 11. Penurunan pondasi

Joint	Penurunan (mm)	Joint	Penurunan (mm)	Joint	Penurunan (mm)
1	-0.236	25	0.050	50	-0.161
2	-0.100	26	-0.190	51	-0.667
3	-0.110	27	-0.459	52	-1.007
4	-0.717	28	-0.794	53	-1.183
5	-1.052	29	-0.989	54	-1.517
6	-0.105	30	-1.309	55	-1.656
7	-0.282	31	-0.104	56	-0.198
8	-0.610	32	-0.104	57	-0.16
9	-0.774	33	-0.104	58	-0.756
10	-1.112	34	-0.104	59	-1.099
11	-1.267	35	-0.104	60	-1.269
12	-0.120	36	-0.105	61	-1.606
13	-0.115	37	-0.105	62	-1.753
14	-0.376	38	-0.274	63	-0.11
15	-0.783	39	-0.556	64	-0.105
16	-1.001	40	-0.886	65	-0.114
17	-1.221	41	-1.086	66	-1.301
18	-1.364	42	-1.405	67	-1.636
19	-0.100	43	-0.110		
20	-0.119	44	-0.210		
21	-0.410	45	-0.286		
22	-0.623	46	-0.602		
24	-0.100	49	-0.130		

Analisa struktur

Berdasarkan hasil analisis struktur menggunakan *Staad pro v.8i*, didapatkan nilai gaya dalam maksimum pada kondisi eksisting akibat beban mati (D) dan beban hidup (L). gaya dalam akibat beban D dapat dilihat seperti pada tabel 12 berikut.

Tabel 12. Gaya dalam struktur akibat D

Gaya batang	Member	Node	Fx kN	Fy kN	My kNm	Mz kNm
Max Fx	58	60	305.108	3.648	0	0
Min Fx	194	179	-23.854	1.676	5.037	-21.154
Max Fy	154	125	-2.977	106.82	-0.578	96.603
Min Fy	346	126	-3.769	-106.5	0.54	97.028
Max My	277	132	30.754	4.001	34.065	7.153
Min My	47	309	45.333	-0.065	-38.826	0.164
Max Mz	346	126	-3.769	-106.5	0.54	97.028
Min Mz	343	238	-3.472	-8.174	0.175	-63.171

Sedangkan gaya dalam akibat beban L dapat dilihat pada tabel 13 berikut.

Tabel 13. Gaya dalam struktur akibat L

Gaya batang	Member	Node	Fx kN	Fy kN	My kNm	Mz kNm
Max Fx	17	17	127.522	1.15	0	0
Min Fx	129	82	-7.232	4.536	0.02	8.836
Max Fy	138	95	2.137	35.45	0.063	39.741
Min Fy	130	84	-3.102	-36.26	-0.019	41.888
Max My	16	83	110.729	0.642	12.846	-1.991
Min My	29	96	114.574	-0.189	-11.565	0.585
Max Mz	130	84	-3.102	-36.26	-0.019	41.888
Min Mz	89	293	-5.873	0.436	-0.009	-21.161

Simpangan per lantai (*storey drift*) didapatkan dari hasil analisis, sedangkan

simpangan antar lantai (*interstorey drift*) dihitung untuk mengetahui kondisi elastisitas gedung. *Interstorey drift* dengan nilai kurang dari atau sama dengan 30 mm menunjukkan struktur dalam kondisi elastis, sebaliknya ketika nilai *Interstorey drift* lebih dari 30 mm, maka struktur dinyatakan dalam kondisi inelastis. Nilai *storey drift* dapat dilihat pada tabel 14. Sedangkan nilai *interstorey drift* dapat dilihat pada tabel 15 berikut.

Tabel 14. simpangan per lantai (*storey drift*)

Story	Height (Meter)	D Drift(mm)		L Drift(mm)	
		X	Z	X	Z
0	0	0	0	0	0
1	2.5	0.363	1.678	-0.03	0.012
1	3.1	0.238	1.237	-0.03	0.02
2	6.2	0.681	3.23	-0.03	0.021

Tabel 15. Simpangan antar lantai (*interstorey drift*)

Story	Height (Meter)	D Δ (mm)		L Δ (mm)		Keterangan
		X	Z	X	Z	
0	0	0	0	0	0	Δ < 30 mm
1	2.5	0.363	1.678	-0.025	0.012	Δ < 30 mm
1	3.1	-0.121	-0.546	0.002	0	Δ < 30 mm
2	6.2	0.443	1.993	0	0.001	Δ < 30 mm

Parameter Statistik Tahanan Komponen Struktur

Nilai-nilai parameter statistik tahanan pada kolom K1 dapat dilihat pada tabel 16 berikut.

Tabel 16. Parameter statistik kolom K1

Uraian	Nominal	μ	σ	λ	V	Distribusi
KOLOM K1 Lantai 1						
f'c (Mpa)	22.5	23.52	1.4	1.05	0.06	Normal
Fy (Mpa)	390	320	1	0.82	0.003	Normal
Ø (mm)	16	15.58	0.59	0.97	0.04	Normal
As (mm ²)	201.062	190.64	14.14	0.95	0.07	Normal
d' (mm)	30	34.7	2.71	1.16	0.080	Normal
KOLOM K1 Lantai 2						
f'c (Mpa)	22.5	23.62	1.44	1.05	0.06	Normal
Fy (Mpa)	390	320	1	0.82	0.003	Normal
Ø (mm)	16	15.56	0.59	0.97	0.04	Normal
As (mm ²)	201.062	190.32	14.14	0.95	0.07	Normal
d' (mm)	30	34.7	2.71	1.16	0.080	Normal

Sedangkan Nilai-nilai parameter statistik tahanan pada kolom lain dapat dilihat pada tabel 17 berikut.

Tabel 17. Parameter statistik kolom K2 dan K3

Uraian	Nominal	μ	σ	λ	V	Distribusi
KOLOM K2 Lantai 1						
f _c (Mpa)	22.5	23.03	1.65	1.02	0.07	Normal
F _y (Mpa)	390	320	1	0.82	0.003	Normal
Ø (mm)	16	15.56	0.59	0.97	0.04	Normal
As (mm ²)	201.062	190.3	14.14	0.95	0.07	Normal
d' (mm)	30	31.14	3.24	1.04	0.1	Normal
KOLOM K2 Lantai 2						
f _c (Mpa)	22.5	22.9	1.34	1.02	0.06	Normal
f _y (Mpa)	390	320	1	0.82	0.003	Normal
Ø (mm)	16	15.56	0.59	0.97	0.04	Normal
As (mm ²)	201.062	190.3	14.14	0.95	0.07	Normal
d' (mm)	30	31.14	3.24	1.04	0.1	Normal
KOLOM K3						
f _c (Mpa)	22.5	17.08	4.27	0.76	0.25	Normal
f _y (Mpa)	390	320	1	0.82	0.003	Normal
Ø (mm)	16	15.56	0.59	0.97	0.04	Normal
As (mm ²)	201.062	190.3	14.14	0.95	0.07	Normal
d' (mm)	30	31.14	3.24	1.04	0.1	Normal

Sedangkan parameter statistik tahanan pada balok dapat dilihat pada tabel 18 berikut

Tabel 18. Parameter statistik tahanan balok

Uraian	Nominal	μ	σ	λ	V	Distribusi
BALOK B1 Lantai 1						
f _c (Mpa)	22.5	18.8	0.46	0.84	0.02	Normal
f _y (Mpa)	295	374.29	1	1.27	0.2	Normal
Ø (mm)	12	11.77	0.19	0.98	0.02	Normal
As (mm ²)	113.1	107.9	7.79	0.54	0.07	Normal
d' (mm)	20	25	1.89	0.83	0.08	Normal
BALOK B2 Lantai 2						
f _c (Mpa)	22.5	22.73	0.35	1.01	0.02	Normal
f _y (Mpa)	390	320	1	0.82	0.003	Normal
Ø (mm)	16	15.56	0.59	0.97	0.04	Normal
As (mm ²)	201.06	190.32	14.1	0.95	0.07	Normal
d' (mm)	30	31.8	2.1	1.06	0.07	Normal
BALOK B3 Lantai 1						
f _c (Mpa)	22.5	23.1	0.37	1.03	0.02	Normal
f _y (Mpa)	390	320	1	0.82	0.003	Normal
Ø (mm)	16	15.56	0.59	0.97	0.04	Normal
As (mm ²)	201.06	190.32	14.1	0.95	0.07	Normal
d' (mm)	30	33.9	1.66	1.13	0.05	Normal

Untuk nilai faktor bias dan koefisien variasi pada komponen kolom di masing-masing lantai, dapat dilihat pada tabel 19 berikut.

Tabel 19. Nilai λ dan V kolom

No	Uraian	λ R	VR
1	K1 lantai 1	0.92	0.15
2	K1 lantai 2	0.92	0.15
3	K2 lantai 1	0.8	0.17
4	K2 lantai 2	0.8	0.17
5	K3	0.6	0.29

Untuk nilai faktor bias dan koefisien variasi pada komponen balok berupa lentur dan geser dapat dilihat pada tabel 20 dan 21 berikut.

Tabel 20. Nilai λ dan V lentur balok

No	Uraian	λ R	VR
1	B1 lantai 1	0.48	0.24
2	B2 lantai 2	0.82	0.12
3	B3 lantai 1	0.89	0.11

Tabel 21. Nilai λ dan V geser balok

No	Uraian	λ R	VR
1	B1 lantai 1	0.5	0.25
2	B2 lantai 2	0.87	0.15
3	B3 lantai 1	0.94	0.14

Parameter Statistik Efek Beban

Parameter statistik efek beban yang bekerja pada struktur didasarkan pada faktor bias (λ) dan koefisien variasi (V) dari beban mati dan beban hidup. Nilai faktor bias (λ) dan koefisien variasi (V) menurut Ellingwood, et al (1980) dapat dilihat pada tabel 22 berikut.

Tabel 22. Nilai λ dan V beban

Beban	Faktor bias (λ)	Koefisien variasi (V)
D	1.05	0.1
L	1	0.18

Indek reliabilitas (β) kolom kondisi aksial dan lentur

Nilai indek reliabilitas (β) dihitung dengan mencari nilai kapasitas nominal kolom dan beban yang bekerja. Parameter statistik tahanan dan parameter statistik efek beban digunakan untuk mencari nilai β yang sesuai. Nilai β yang dihitung akan dibandingkan dengan nilai target β , jika nilai $\beta < \beta$ target maka komponen struktur dinyatakan gagal.

Nilai $\beta < \beta$ target untuk kolom dapat dilihat pada beberapa tabel 23 berikut.

Tabel 23. Nilai $\beta < \beta$ target kolom

No	Kolom	Member
1	K2 lantai 1	28, 40
2	K2 lantai 2	246,247,251,252,259,262
3	K3	2,3,23,30,33,42,47,54,61,62,63

Indek reliabilitas balok kondisi lentur

Balok yang memiliki nilai indek reliabilitas kurang dari nilai target indek reliabilitas ($\beta_T = 2,5$) terjadi pada balok B1, yaitu pada member balok 466,467,468,469,470,472,473,477,478,479,480,482,483,484 serta pada balok B2 member 425 dan 428.

Indek reliabilitas balok kondisi geser

Balok yang memiliki nilai indek reliabilitas kurang dari nilai target indek reliabilitas ($\beta_T = 2,5$) terjadi pada balok B1 dan dapat dilihat pada tabel 24 berikut.

Tabel 24. Nilai $\beta < \beta$ target balok

No	Balok	Member
1	B1	466,467,468,469,470 472,473,477,480,481,482,483,484

Kalibrasi faktor keamanan komponen struktur kolom

Dari hasil perhitungan, didapatkan nilai faktor keamanan parsial (PSF) di kolom pada kondisi eksisting seperti pada tabel 25 berikut.

Tabel 25. Nilai PSF komponen kolom

Kolom	β	ϕ	γ_D	γ_L	Keterangan
K1L1	3	0.624	1.171	1.307	aksial dan lentur
K1L2	3.09	0.616	1.178	1.32	aksial dan lentur
K2L1	1.88	0.695	1.106	1.191	aksial dan lentur
K2L2	1.32	0.67	1.127	1.229	aksial dan lentur
K3	0.41	0.53	1.034	1.061	aksial dan lentur

Kalibrasi faktor keamanan komponen struktur balok

Dari hasil perhitungan, didapatkan nilai faktor keamanan parsial (PSF) di kolom pada kondisi eksisting seperti pada tabel 26 berikut.

Tabel 26. Nilai PSF komponen balok

Balok	β	ϕ	γ_D	γ_L	Keterangan
B1	0.07	0.922	1.004	1.008	lentur
B2	2.96	0.611	1.159	1.286	lentur
B3	2.51	0.715	1.13	1.235	lentur
B1	0.89	0.845	1.064	1.115	geser
B2	5.32	0.371	1.347	1.624	geser
B3	4.04	0.519	1.262	1.471	geser

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan analisa dan pengukuran di lapangan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Volume kerusakan non struktural terbesar terdapat pada pintu geser utama sebesar 66,67%, sedangkan kerusakan struktural terbesar berupa terkelupasnya lapisan spesi yaitu di kolom K2 sebesar 25%.
2. Berdasarkan hasil pengukuran, terjadi penurunan tanah yang tidak seragam dengan nilai penurunan maksimum sebesar 1.752 cm.
3. Parameter statistik tahanan pada komponen kolom eksisting dipengaruhi oleh faktor material dan faktor fabrikasi, dimana nilai faktor bias (λ) terkecil dan koefisien variasi (V) terbesar terjadi pada kolom K3 dengan masing-masing sebesar 0,60 dan 0,29. Nilai faktor bias (λ) terkecil dan koefisien variasi (V) terbesar pada balok terjadi di balok B2 dengan masing-masing nilai sebesar 0,82 dan 0,12.
4. Nilai indek reliabilitas (β) komponen kolom terkecil dengan nilai 0,41 terjadi pada kolom K3, sedangkan nilai indek reliabilitas (β) terkecil pada balok terjadi di balok B1 dengan nilai $\beta < 0.07$.
5. Perhitungan nilai indek reliabilitas yang dilakukan secara analitis dan simulasi *Monte Carlo* menghasilkan nilai yang tidak terlalu jauh berbeda. Simulasi *Monte Carlo* memiliki kelebihan pada ketelitian hasil, dimana jumlah iterasi dari sampel yang dihitung akan berpengaruh pada nilai hasil.
6. Nilai indek reliabilitas (β) komponen kolom terkecil 0,41 menghasilkan nilai ϕ sebesar 0,53 dan γ_D serta γ_L masing-masing sebesar 1,034 dan 1,061. sedangkan nilai indek reliabilitas (β) terkecil pada balok terjadi di balok B1

dengan nilai $\beta < 0.07$ menghasilkan nilai ϕ sebesar 0,922 dan γ_D serta γ_L masing-masing sebesar 1,004 dan 1,008.

Saran

Berdasarkan hasil analisa dan keterbatasan kajian, maka beberapa hal yang diperhatikan adalah sebagai berikut.

1. Perbaikan dari kerusakan pada komponen struktural perlu dilakukan agar volume kerusakan yang terjadi tidak meningkat.
2. Analisa struktur perlu dipertimbangkan terhadap penurunan pondasi jangka panjang dalam menentukan nilai indeks reliabilitas (β).
3. Perubahan fungsi struktur bangunan layak dipertimbangkan dengan memperhatikan nilai *partial safety factor* dari variabel tahanan dan beban jika tidak dilakukan perkuatan struktur sehingga kegagalan struktur dapat dihindari.

Arbor, MI 48109-2125

7. Uzarsky and Grussing. 2006. Condition Assessment Manual for Building Component-Sections, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory.
8. Watt, David S, 2007. *Building Pathology*. Oxford UK, Blackwell Science Publishing

DAFTAR PUSTAKA

1. Allen, M. Tony, et al, 2005, *Calibration to Determine Load and Resistance Factors for Geotechnical and Structural Design*, Transportation Research Board of National Academies, Transportation Research Circular Number E-C079. Washington DC.
2. Ellingwood, et al, 1980. *Development of Probability Based Load Criterion Of American National Standard A58*. US Department Of Commerce and National Bureau Of Standar Special Publication 577.
3. El Reedy M.A, 2013. *Reinforced Concrete Structure Reliability*, Boca Raton, CRC Press.
4. Galambos and Yu, 1984, *Load and Resistance Factor Design Of Cold-Formed Steel Structural Members*, St. Louis, Missouri, U.S.A Seventh International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
5. Nowak, A.S and Kaszynska, M, 2011. *Target Reliability For New, Existing And Historical Structures*, Polytechnic Krakowskiej, Technical Transaction Civil Engineering 3-B.
6. Nowak, A.S and Szerszen, M.M, 2012. *Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318), Part 1: Statistical Models for Resistance*, University of Michigan, Ann