

Aplikasi Metode Performance Based Design dalam Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Beton 6 Lantai

Arie Sempana SURBAKTI¹, Martius GINTING^{1*}, Samsuardi BATUBARA¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Santo Thomas, email: martius_gt@yahoo.com

Sejarah artikel

Diserahkan: 02 September 2023
Dalam bentuk revisi: 29 September 2023

Diterima: 30 September 2023
Tersedia online: Oktober 2023

Abstract

Indonesia frequently experiences seismic activity due to its location within the Pacific earthquake belt (Circum Pacific Earthquake Belt) and the Asian earthquake belt (Trans Asiatic Earthquake Belt). During an earthquake event, it is crucial that buildings can withstand seismic forces up to a certain level without significant damage to their structural and non-structural elements. The Direct Displacement Based Design (DDBD) method represents a novel approach to performance-based earthquake-resistant structural design for buildings. In this study, office buildings in Medan were evaluated against Life Safety performance criteria (ATC-40). The analysis was conducted using the ETABS software to determine the forces acting on structural elements and to assess the structural behavior through non-linear pushover analysis. Furthermore, earthquake response comparisons were made between the DDBD method and the regulatory guidelines stipulated in SNI 1726-2019. The evaluation results for the office buildings indicate performance levels of 0.022 in the X direction and 0.019 in the Y direction, with a life safety limit set at 0.02. Consequently, it can be concluded that the buildings have exceeded the life safety limit in the X direction, while exhibiting behavior consistent with the performance target in the Y direction.

Keywords: performance based seismic design, spectrum response, direct displacement based design, concrete building

Abstrak

Indonesia sering mengalami aktivitas gempa bumi karena posisinya yang berada dalam jalur gempa pasifik (Circum Pasific Earthquake Belt) dan jalur gempa Asia (Trans Asiatic Earthquake Belt). Saat terjadi gempa, sangat penting bahwa bangunan dapat menahan gaya-gaya gempa hingga tingkat tertentu tanpa mengalami kerusakan signifikan pada elemen struktural maupun non-strukturalnya. Metode Direct Displacement Based Design (DDBD) merupakan pendekatan baru dalam desain struktural berbasis kinerja untuk ketahanan gempa pada bangunan. Dalam penelitian ini, gedung perkantoran di Medan dievaluasi sesuai kriteria kinerja Life Safety (ATC-40). Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ETABS untuk menentukan gaya-gaya yang bekerja pada elemen-elemen struktural dan untuk mengevaluasi perilaku struktural melalui analisis non-linear pushover. Selain itu, perbandingan respons gempa dilakukan antara metode DDBD dan pedoman peraturan yang diatur dalam SNI 1726:2019. Hasil evaluasi untuk gedung perkantoran menunjukkan tingkat kinerja sebesar 0,022 dalam arah X dan 0,019 dalam arah Y, dengan batasan kinerja life safety ditetapkan pada 0,02. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa gedung-gedung tersebut melebihi batasan kinerja life safety dalam arah X, sementara menunjukkan perilaku yang sesuai dengan target kinerja dalam arah Y.

Kata kunci: performance based seismic design, respon spektrum, direct displacement based design, bangunan beton

1. Pendahuluan

Indonesia, sebagai negara yang terletak di jalur gempa Pasifik dan Asia, telah menghadapi sejarah yang panjang dan memilukan terkait gempa bumi yang terus-menerus mengguncangnya. Statistik menyebutkan bahwa sejak beberapa dekade terakhir, Indonesia menjadi salah satu negara paling sering terkena gempa bumi di dunia (Sudibyakto, 2018). Sebagai gambaran, dalam tahun-tahun terakhir, telah tercatat gempa-gempa besar yang mengakibatkan hilangnya ribuan nyawa, merusak ribuan bangunan, dan menyebabkan kerugian ekonomi yang mencapai miliaran dolar. Gempa-gempa ini, yang merupakan hasil dari kompleksitas geologi di wilayah ini, menyatakan bahwa Indonesia adalah salah satu wilayah yang paling rentan terhadap gempa bumi di dunia.

Selain menyebabkan kerugian manusia yang tak terbayangkan, gempa bumi juga memiliki dampak ekonomi yang signifikan. Bangunan dan infrastruktur sering menjadi korban utama dalam situasi seperti ini. Dalam beberapa kasus, kerusakan yang disebabkan oleh gempa telah mengganggu stabilitas sosial dan ekonomi selama berbulan-bulan atau bahkan bertahun-tahun setelahnya. Untuk mengatasi ancaman gempa ini, perencanaan konstruksi yang cermat dan tahan gempa menjadi sangat penting. Dalam beberapa dekade terakhir, Indonesia telah mengandalkan desain berbasis gaya atau *force based design* sebagai metode utama untuk menghadapi gempa. Meskipun metode ini telah terbukti berhasil dalam beberapa kasus, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah membuka jalan bagi metode perencanaan yang lebih canggih dan komprehensif, yang dikenal sebagai *performance-based design* (Ertanto, dkk., 2017; Pranata, 2006).

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi metode *performance-based design* dalam konteks bangunan bertingkat 6 lantai di daerah-daerah yang rentan terhadap gempa di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keunggulan dan kelemahan metode ini, serta bagaimana penerapannya dapat memberikan dampak positif dalam mengurangi kerugian manusia dan ekonomi akibat gempa di Indonesia. Dengan demikian, penelitian ini bukan hanya tentang perbaikan teknis dalam perencanaan bangunan, tetapi juga tentang meningkatkan keselamatan dan kualitas hidup penduduk Indonesia, serta menghasilkan kontribusi yang lebih besar dalam pengembangan pedoman konstruksi tahan gempa yang dapat berdampak lebih luas baik di Indonesia maupun di negara-negara dengan risiko gempa serupa di seluruh dunia.

2. Kriteria Desain

Dalam mendesain bangunan agar memiliki ketahanan yang optimal terhadap beban dinamis seperti gempa bumi, ada sejumlah kriteria desain yang harus diperhatikan. Secara umum, kriteria-kriteria ini bertujuan untuk memastikan bahwa bangunan akan memiliki performa yang diinginkan. Berikut adalah beberapa kriteria desain yang relevan:

- a. Kekuatan (*Strength*)
Kekuatan bangunan adalah kemampuannya untuk menahan berbagai kombinasi beban selama masa layan bangunan. Kriteria kekuatan yang memadai adalah ketika tegangan yang terjadi dalam berbagai kombinasi beban tetap berada dalam batas tegangan izin (*stress govern*).
- b. Kekakuan (*Stiffness*)
Kekakuan struktur merujuk pada kemampuannya untuk mengatasi deformasi yang disebabkan oleh beban eksternal, termasuk respons dinamis terhadap getaran atau beban dinamis yang mungkin terjadi di sekitar bangunan.
- c. Sistem Pelepasan Energi (*Energy Dissipation System*)
Saat terjadi gempa, bangunan gedung dapat mengalami kerusakan, terutama jika gempa melebihi perkiraan awal. Namun, kerusakan ini harus terlokalisasi pada elemen struktural tertentu, biasanya pada sendi plastis yang telah direncanakan. Hal ini penting karena kerusakan di sini memungkinkan pelepasan energi yang aman.

d. Stabilitas (*Stability*)

Ketika bangunan terkena beban dinamis seperti getaran akibat gempa, struktur akan mengalami perubahan tegangan materialnya serta tegangan plastis. Stabilitas struktur terkait dengan kemampuannya untuk tetap stabil dan tidak mengalami penurunan kekuatan yang signifikan (penurunan kekuatan kurang dari 20%) saat mengalami perubahan ini.

e. Daktilitas

Daktilitas struktur mengacu pada kemampuannya untuk mengalami deformasi inelastik tanpa kehilangan kekuatan yang signifikan. Struktur yang daktil mampu mengalami deformasi pasca-elastis yang besar berulang kali akibat gempa, sambil tetap mempertahankan kekuatan yang cukup untuk tetap berdiri. Ini memastikan bahwa struktur tidak mengalami kegagalan tiba-tiba selama gempa.

Oleh karena itu, dalam merancang bangunan tahan gempa, penting untuk memastikan bahwa struktur memiliki daktilitas yang memadai untuk mencegah kegagalan tiba-tiba. Dengan begitu, penghuni bangunan masih memiliki kesempatan untuk menyelamatkan diri selama terjadinya gempa.



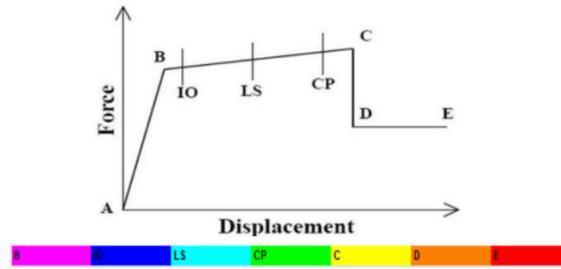
Gambar 1. Diagram akibat dari struktur daktil dan getas

3. Performance Based Design

Analisis *Non-Linear Pushover*, juga dikenal sebagai analisis statik non-linier atau analisis beban dorong statik (Dewobroto, 2005; Tavio, 2018), merupakan salah satu prosedur analisis yang sangat berguna dalam memahami perilaku bangunan terhadap gempa bumi. Proses analisis ini melibatkan pemberian pola beban lateral statik pada struktur secara bertahap, dengan faktor pengali yang ditingkatkan hingga mencapai target perpindahan lateral tertentu dari suatu titik referensi atau ketika elemen struktur mencapai batas keruntuhan (Lumbantobing, 2016).

Hasil akhir dari analisis ini menghasilkan informasi tentang gaya geser dasar (*base shear*) yang diperlukan dan simpangan (*displacement*) yang dialami oleh struktur tersebut. Data ini kemudian digambarkan dalam bentuk kurva kapasitas yang memberikan gambaran lengkap tentang perilaku struktur terhadap beban gempa. Analisis *pushover* juga memungkinkan untuk menilai level kinerja struktur dengan merujuk pada titik performa yang ditentukan oleh perpotongan antara kurva kapasitas dan *reduce demand spectrum* (Priestley, dkk., 2007).

Selain memberikan gambaran kinerja keseluruhan struktur, analisis *pushover* juga dapat mengidentifikasi elemen-elemen struktur tertentu yang berpotensi mengalami kegagalan selama gempa. Program ETABS versi 18 memiliki kemampuan untuk mengadopsi tingkat kinerja dari (FEMA-356; FEMA-440; FEMA 451), termasuk mekanisme plastifikasi pada sendi plastis elemen struktur.

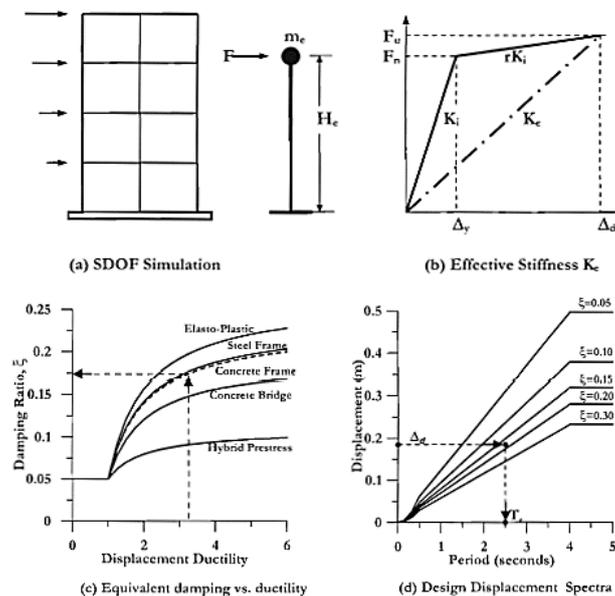


Gambar 2. Kurva hubungan gaya dan perpindahan serta karakteristik sendi plastis

Kurva diatas menunjukkan hubungan gaya dan perpindahan serta karakteristik sendi plastis yang bergerak dari titik A-B-C-D-E. Titik – titik tersebut menunjukkan karakteristik sendi plastis yang timbul pada elemen struktur hasil analisis pushover. Pada Gambar 3 dapat dijelaskan bahwa:

- A = Merupakan Kondisi dimana belum ada pembebanan sehingga belum terjadi plastifikasi pada sendi plastis
- B = Merupakan kondisi dimana elemen mulai mengalami leleh pertama kali
- IO = Merupakan tahapan setelah leleh (plastis) dengan tingkat kinerja pada elemen Immediately Occupancy
- LS = Elemen pada level kinerja *Life Safety* (kondisi plastis)
- CP = Elemen pada level kinerja *Collapse Prevention* (kondisi hampir runtuh)
- C = Merupakan kapasitas ultimit dari elemen
- D = Kekuatan sisa dari elemen
- E = Merupakan batas dimana elemen sudah mengalami keruntuhan

Selanjutnya, munculnya metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) menjadi langkah penting dalam memperbaiki metode desain berbasis gaya atau *Force Based Design* (FBD) yang memiliki kelemahan tertentu. DDBD menekankan pentingnya simpangan (displacement) sebagai parameter utama dalam menentukan kekuatan yang diperlukan oleh bangunan untuk menghadapi gempa desain. Perbedaan mendasar antara DDBD dan FBD adalah bahwa DDBD menekankan desain struktur berdasarkan satu derajat kebebasan (*Single Degree of Freedom*/SDOF) dengan fokus pada respon perpindahan puncak, bukan pada karakteristik elastik awal seperti yang biasa digunakan dalam FBD. Dengan pendekatan ini, DDBD bertujuan untuk memastikan bahwa bangunan tetap berkinerja baik dan aman terhadap gempa dengan menitikberatkan pada respon perpindahan yang lebih realistis. Konsep desain berbasis perpindahan *Direct Displacement Based Design* secara umum diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Konsep direct displacement based design

Gambar 3 dapat diuraikan seperti berikut:

- Gambar (a): Mengkonseptualisasikan perubahan dari sistem dengan banyak derajat kebebasan (MDOF) menjadi sistem dengan satu derajat kebebasan (SDOF).
- Gambar (b): Menghitung nilai gaya geser pada saat mencapai kondisi inelastik maksimum dengan memahami karakteristik kekakuan efektif struktur yang didasarkan pada idealisasi respons histeris inelastis struktur dalam sistem dengan satu derajat kebebasan (SDOF). Ini digunakan sebagai representasi kinerja pada respon perpindahan puncak.
- Gambar (c): Menghitung karakteristik redaman viskos ekuivalen (damping ekuivalen) dari struktur atau sistem struktur dengan merujuk pada karakteristik redaman elastis awal dan nilai *displacement ductility* dari sistem struktur.
- Gambar (d): Biasanya, dalam desain konvensional, respon spektrum gempa direpresentasikan dalam kondisi elastis dengan redaman sekitar 5%. Dalam DDBD, desain respon gempa tidak lagi berdasarkan kondisi elastis tetapi menggunakan karakteristik redaman inelastis dari struktur yang sedang direncanakan. Kemudian, nilai respon gempa dalam kondisi redaman inelastis struktur diubah menjadi format Spektra Perpindahan (*displacement spectra*) untuk menentukan nilai periode efektif sistem dengan satu derajat kebebasan (SDOF) pada saat respon perpindahan puncak dengan redaman inelastis dari sistem. Hal ini dilakukan untuk menghitung nilai gaya geser dasar saat struktur dalam kondisi inelastik.

Sehingga setelah melakukan perhitungan dengan metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD), maka didapat nilai distribusi gaya geser dasar tiap lantai sesuai dengan level kinerja yang diinginkan.

4. Metodologi Penelitian

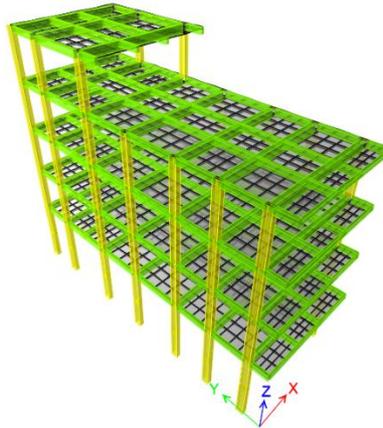
Analisis menggunakan metode Spektrum Kapasitas (*Capacity Spectrum*) dan metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD). Model 6 lantai fungsi gedung sebagai perkantoran dan di analisis dengan menggunakan program ETBAS 18. Sebelumnya pada hasil desain bangunan yang direncanakan pada tahun 2018 ini menggunakan SNI 1726:2012 sebagai beban gempa nya, SNI 1727:2013 untuk beban desain minimum, dan SNI 2847:2013 sebagai persyaratan beton struktural. Oleh karena itu, dalam penelitian ini pemakaian SNI di-*upgrade* dengan SNI terbaru seperti SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, SNI 2847:2019. Dalam penelitian ini, gedung perkantoran di Medan dievaluasi sesuai kriteria kinerja Life Safety (ATC-40). Tinggi lantai bervariasi, pada lantai dasar dengan lantai dua yaitu 5,5 meter, dengan lantai mezzanine diantara kedua lantai tersebut setinggi 2,5 meter dari lantai dasar, selanjutnya untuk lantai berikutnya sampai lantai ke enam memiliki tinggi antar lantai dengan tinggi 3,75 meter. Untuk spesifikasi material dan dimensi balok dan kolom dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi material

Data	Spesifikasi
Mutu Beton	f'_c 25 MPa
Modulus Elastisitas Beton	$4700 \sqrt{25} = 23500$ MPa
Tulangan Ulir	f_y 420 MPa
Tebal Plat Lantai	120 mm

Tabel 2. Dimensi elemen struktur

Kolom	Balok
K1 = 35 x 50 (cm)	B1 = 20 x 40 (cm)
K2 = 20 x 30 (cm)	B2 = 20 x 30 (cm)
	B3 = 30 x 60 (cm)
	B4 = 20 x 40 (cm)
	B5 = 20 x 50 (cm)
	B6 = 15 x 30 (cm)
	B7 = 20 x 60 (cm)



Gambar 4. Pemodelan Struktur pada Aplikasi ETABS

Tabel 3. Perhitungan Tipe Tanah Menggunakan N-spt

Lapis	N-spt	Tebal (d _i), (m)	$\frac{d_i}{N_i}$	$\sum \frac{d_i}{N_i}$	$\bar{N} = \frac{30}{\sum \bar{N}}$
0	0	0	0,00	1,73	17,09
2	3	2	0,67		
4	15	2	0,13		
6	18	2	0,11		
8	24	2	0,08		
10	33	2	0,06		
12	59	2	0,03		
14	6	2	0,33		
16	26	2	0,08		
18	47	2	0,04		
20	60	2	0,03		
22	47	2	0,04		
24	54	2	0,04		
26	60	2	0,03		
28	60	2	0,03		
30	60	2	0,03		

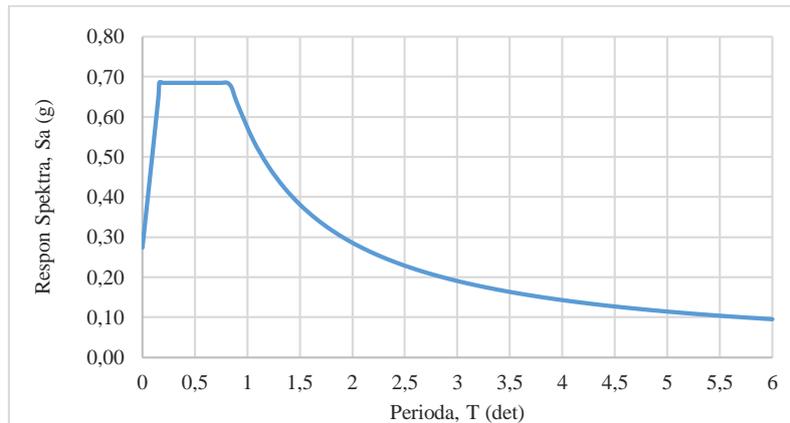
Dari hasil tersebut didapat $\bar{N} = 17,09$, maka berdasarkan Tabel 3 didapat tipe tanah sedang (SD).

Pendekatan dalam pembebanan struktur ini mengacu pada panduan SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lainnya dan juga pedoman ASCE 7-16 *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* untuk menghitung beban mati, beban mati tambahan, dan beban hidup. Selain itu, untuk menentukan beban gempa desain, pedoman yang digunakan adalah SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung. Beban mati tambahan dan beban hidup yang digunakan dalam perhitungan adalah sebagai berikut:

- Keramik + spesi = 1,10 kN/m²
- Ducting mekanikal = 0,19 kN/m²
- Penggantung langit-langit = 0,1 kN/m²
- Plafon = 0,05 kN/m²
- Lapisan waterproofing = 0,05 kN/m²
- Beban hidup hunian = 2,40 kN/m²
- Beban hidup atap = 0,96 kN/m²

Pada metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD), respons terhadap gempa mengacu pada perhitungan sesuai dengan SNI 1726:2019. Gempa yang diperhitungkan adalah gempa rencana dengan probabilitas terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%. Data respon spektrum gempa diambil dari aplikasi "Peta Gempa dan Respon Spektra 2019, PUSGEN-PUSKIM PUPR" yang didasarkan pada pedoman SNI 1726:2019. Grafik respon spektrum yang digunakan telah dirancang sesuai dengan karakteristik wilayah geografis di Indonesia serta tipe struktur yang akan dibangun. Data

tersebut dijelaskan dalam gambar berikut mengenai kurva respon spektrum sesuai dengan SNI 1726:2019.



Gambar 5. Kurva respon spektrum desain

Koefisien faktor sesuai dengan SRPMK, yaitu R_a , Ω_0^b , C_d^c :

$$\begin{aligned} R &= 8 \\ \Omega_0^b &= 3 \\ C_d^c &= 5,5 \end{aligned}$$

Selanjutnya, informasi mengenai gedung, termasuk detail struktur seperti balok, kolom, dan pelat lantai, diambil dari gambar *Detailed Engineering Design* (DED). Gedung ini akan dirancang dengan tingkat kinerja *Life Safety*, dengan tingkat simpangan rencana sesuai dengan FEMA-356, yaitu 0,02. Hasil perhitungan mencakup perhitungan gaya geser dasar dan distribusi beban pada setiap lantai gedung.

1) Arah X

$$V_{base} = 5016,68 * 0,22 = 1103,67 \text{ kN}$$

Tabel 4. Perhitungan distribusi gaya geser per lantai arah X

Level	Tinggi H_i (m)	Mass m_i (ton)	Δ_i (m)	$m_i \cdot \Delta_i$	V_b (kN)	F_i (kN)
6 (Atap)	20,5	42,97	0,32	13,63	1103,671	110,37
5	16,75	140,65	0,27	38,67	1103,671	274,21
4	13	174,67	0,23	39,42	1103,671	279,49
3	9,25	174,67	0,17	29,57	1103,671	209,68
2	5,5	170,08	0,11	18,00	1103,671	127,65
1 (Mezzanine)	2,5	15,85	0,05	0,79	1103,671	5,62
(Dasar)	0,0		0,00	0,00	1103,671	0,00
Total		718,90		140,09		1007,03

2) Arah Y

$$V_{base} = 4636,61 * 0,22 = 1020,05 \text{ kN}$$

Tabel 5. Perhitungan distribusi gaya geser per lantai arah Y

Level	Tinggi H_i (m)	Mass m_i (ton)	Δ_i (m)	$m_i \cdot \Delta_i$	V_b (kN)	F_i (kN)
6 (Atap)	20,5	42,97	0,32	13,63	1020,05	102,01
5	16,75	140,65	0,27	38,67	1020,05	253,44
4	13	174,67	0,23	39,42	1020,05	258,32
3	9,25	174,67	0,17	29,57	1020,05	193,79
2	5,5	170,08	0,11	18,00	1020,05	117,98
1 (Mezzanine)	2,5	15,85	0,05	0,79	1020,05	5,19
(Dasar)	0		0,00	0,00	1020,05	0,00
Total		718,90		140,09		930,73

Kombinasi pembebanan menggunakan kombinasi yang ada pada peraturan SNI 1727:2020. Berikut ini adalah kombinasi pembebanan yang akan digunakan :

1. $1,4D$
2. $1,2D + 1,6L + 0,5Lr$
3. $1,2D + 1,6Lr + L$
4. $1,2D + L + 0,5Lr$
5. $0,9D$
6. $1,2D + Ev + Eh + L$
 - a. $1,2D + 1Ex + 0,3Ey + L$
 - b. $1,2D + 1Ex - 0,3Ey + L$
 - c. $1,2D - 1Ex + 0,3Ey + L$
 - d. $1,2D - 1Ex - 0,3Ey + L$
 - e. $1,2D + 0,3Ex + 1Ey + L$
 - f. $1,2D + 0,3Ex - 1Ey + L$
 - g. $1,2D - 0,3Ex + 1Ey + L$
 - h. $1,2D - 0,3Ex - 1Ey + L$
7. $0,9D - Ev + Eh$
 - a. $0,9D + 1Ex + 0,3Ey$
 - b. $0,9D + 1Ex - 0,3Ey$
 - c. $0,9D - 1Ex + 0,3Ey$
 - d. $0,9D - 1Ex - 0,3Ey$
 - e. $0,9D + 0,3Ex + 1Ey$
 - f. $0,9D + 0,3Ex - 1Ey$
 - g. $0,9D - 0,3Ex + 1Ey$
 - h. $0,9D - 0,3Ex - 1Ey$

5. Analisis dan Pembahasan

Hasil dari analisis dan pemodelan struktur telah menghasilkan gaya-gaya internal yang akan menjadi dasar untuk proses detail struktur dalam perencanaan struktur utama seperti balok dan kolom. Informasi tentang gaya-gaya internal ini telah diperoleh melalui perangkat lunak ETABS 2018. Gaya-gaya dalam terbesar yang terkait dengan berbagai jenis bagian struktur akan dipresentasikan dalam Tabel 6 dan Tabel 7 selanjutnya.

Tabel 6. Tampilan *output* gaya dalam balok.

Section	Daerah	M_u (Lapangan) (kN.m)	M_u (Tumpuan) (kN.m)	V_u (Lapangan) (kN)	V_u (Tumpuan) (kN)
Balok 1 20×40	+	42,639	49,182	51,039	120,954
	-	-24,159	-100,979		
Balok 2 20×30	+	17,313	19,926	43,127	94,535
	-	-15,446	-33,037		
Balok 3 30×60	+	217,299	124,136	164,901	286,724
	-	-56,163	-343,097		
Balok 4 20×40	+	49,402	67,528	73,513	149,162
	-	-53,635	-82,398		
Balok 5 20×50	+	101,789	67,528	128,563	149,162
	-	-99,013	-161,511		
Balok 6 15×30	+	13,162	11,716	9,448	10,467
	-	-5,990	-12,517		
Balok 7 20×60	+	156,372	44,762	106,342	212,945
	-	-10,061	-204,382		

Tabel 7. Tampilan output gaya dalam kolom

Section	M_{ux} (kN.m)	M_{uy} (kN.m)	V_{ux} (kN)	V_{uy} (kN)	P_n (kN)
Kolom 1 35x50	247,038	140,23	61,3	102,456	-1606,99
Kolom 2 20x30	-55,64	92,6	72,187	43,597	-408,854

Setelah dilakukan perhitungan penulangan terhadap balok dan kolom, maka dapat di rekap penulangan tiap balok dan kolom yang dapat di lihat pada Tabel 8 dan Tabel 9. Untuk menilai apakah perilaku dan kinerja struktur sesuai dengan yang telah direncanakan, perlu dilakukan evaluasi kinerja struktur yang mencakup penilaian tingkat kinerja, perbandingan dengan perilaku yang diharapkan, dan penyempurnaan respon struktur. Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan membandingkan hasil penulangan sesuai dengan pekerjaan penulisan ini, sebagaimana tercantum dalam Tabel 10.

Tabel 8. Rekapitulasi penulangan balok

Balok	Tul. Longitudinal			Tul. Transversal	
	Daerah	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
Balok 1 (20x40)	Atas	5 – D16	2 – D16	D8 – 85	D8 - 170
	Bawah	3 – D16	2 – D16		
Balok 2 (20x30)	Atas	3 – D13	2 – D13	D8 – 80	D8 - 120
	Bawah	2 – D13	2 – D13		
Balok 3 (30x60)	Atas	10 – D16	3 – D16	D8 – 90	D8 – 260
	Bawah	4 – D16	6 – D16		
Balok 4 (20x40)	Atas	6 – D13	4 – D13	D8 – 80	D8 – 160
	Bawah	5 – D13	4 – D13		
Balok 5 (20x50)	Atas	6 – D13	4 – D13	D8 – 90	D8 – 115
	Bawah	3 – D13	4 – D16		
Balok 6 (15x30)	Atas	2 – D13	2 – D13	D8 – 120	D8 – 120
	Bawah	2 – D13	2 – D13		
Balok 7 (20x60)	Atas	6 – D16	2 – D16	D8 – 115	D8 - 260
	Bawah				

Tabel 9. Rekapitulasi penulangan kolom

Kolom	Tul. Longitudinal	Tul. Transversal		Spasi	
		Arah x	Arah y	S.Plastis	Luar SP
K1 (35x50)	20-D16	D13, 3 kaki	D13, 5 kaki	75	95
K2 (20x30)	12-D16	D10, 2 kaki	D10, 2 kaki	150	150

Tabel 10. Penentuan *performance level* desain dan hasil analisis

Arah	Parameter	Rencana DDBD	Hasil Analisis <i>Pushover</i>
Arah X	Target Perpindahan, Δ_m (m)	0,22	0,5
	<i>Drift</i> aktual (Δ_m/H_n)	-	0,024
	<i>Performance Level</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Life Safety – Collapse Prevention</i>
Arah Y	Target Perpindahan, Δ_m (m)	0,22	0,318
	<i>Drift</i> aktual (Δ_m/H_{tot})	-	0,015
	<i>Performance Level</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Damage Control – Life Safety</i>

Tabel 10 menunjukkan bahwa nilai *drift* pada arah X dan Y adalah 0,024 dan 0,015, secara berturut-turut. Perlu dicatat bahwa arah Y mencapai tingkat kinerja *damage control - life safety*, sesuai dengan target kinerja yang diharapkan, sementara pada arah X, kinerja melebihi target yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, secara keseluruhan, setelah mengalami gempa, struktur menunjukkan perilaku dengan tingkat kinerja *life safety* pada arah X, sedangkan pada arah Y, telah melampaui tingkat kinerja yang diharapkan. Selanjutnya akan dilakukan perbandingan antara parameter-parameter hasil analisis dengan tabel Faktor R, Ω , dan Cd yang ada di SNI 1726:2019.

Tabel 11. Perbandingan parameter respon dengan nilai faktor pada SNI 1726:2019

Parameter Respon	Arah X		Arah Y	
	DDBD	SNI 2019	DDBD	SNI 2019
$R (V_e/V_d)$	7,13	8	7,72	8
$\Omega(V_u/V_d)$	3,08	3	2,27	3
$C_d(\Delta_u/\Delta_d)$	4,1	5,5	4,2	5,5

Dari data yang tercantum dalam Tabel 11, dapat diamati bahwa parameter respon struktural yang diperoleh melalui pendekatan berbasis gaya akan menunjukkan perbedaan nilai antara arah X dan arah Y pada struktur tersebut. Ini disebabkan oleh variasi konfigurasi struktur meskipun menggunakan sistem rangka yang sama, yaitu rangka portal beton bertulang, namun mengikuti konfigurasi yang berbeda dalam setiap arahnya. Hasil perencanaan yang diperoleh melalui metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) menunjukkan nilai yang relatif serupa dengan nilai yang diacu dalam SNI 1726:2019, yaitu masuk ke dalam kategori Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

Setelah diketahui nilai gaya geser dasar pada tiap metode yang digunakan, yaitu:

- a. Gaya Geser Dasar Respon Spektrum
 Gaya geser dasar berdasarkan dari respon spektrum, yang dihitung dari penjumlahan dari gaya geser per lantai yang dihasilkan dari aplikasi Etabs.
- b. Gaya Geser Dasar DDBD (*Life Safety*)
 Gaya geser dasar yang dihitung berdasarkan level kinerja yang diinginkan, yaitu *Life Safety*.
- c. Gaya Geser Dasar *Pushover* (Limit)
 Gaya geser dasar limit ataupun gaya geser dasar terakhir yang dapat dipikul bangunan sebelum terjadinya keruntuhan, yang didapat dari *Pushover*.

Berdasarkan gaya – gaya geser yang telah di jelaskan, maka dapat di tabelkan gaya – gaya tersebut seperti pada Tabel 12. Berdasarkan ketiga gaya geser dasar pada Tabel 12 dapat disimpulkan bahwa gaya geser dasar yang diberikan dengan metode respon spektrum ataupun gaya geser dasar yang terjadi ketika kita menghitung berdasarkan SNI 1726:2019 masih dibawah gaya geser dasar DDBD yang sesuai dengan level kinerja yang diharapkan, yaitu *Life Safety*, yang artinya ketika menghitung suatu bangunan dengan pendesainan dengan dasar respon spektrum SNI 1726:2019 bangunan tersebut sudah aman sesuai dengan syarat yang berlaku tetapi kinerja yang diharapkan tidak mencapai karna gaya geser dasar DDBD lebih besar dari gaya geser dasar dari desain respon spektrum. Sehingga ketika melakukan evaluasi kinerja bangunan tidak mencapai kriteria kinerja *Life Safety*, karena penggunaan perhitungan desain gaya geser dasar yang ada itu dibawah nilai gaya geser kinerja *Life Safety*.

Tabel 12. Tabel gaya - gaya geser dasar

	Gaya Geser Dasar (kN)	
	X	Y
Respon Spektrum	591,62	591,62
DDBD (<i>Life Safety</i>)	1007,02	930,73
<i>Pushover</i> (Limit)	3120,22	2112,17

6. Kesimpulan

Setelah melakukan analisis *performance based design*, maka ditarik beberapa kesimpulan :

- Berdasarkan hasil *Pushover*, level kinerja yang terjadi pada bangunan dengan kondisi kelas situs Tanah Sedang (SD), tidak dapat memenuhi level kinerja yang diinginkan yang dimana terjadi level kinerja *Life Safety Collapse Prevention* untuk arah X, sedangkan jika dilakukan penurunan respon spektrum dengan cara diganti kondisi kelas situs dengan kelas situs Tanah Keras (SC), struktur arah X dan Y mampu memenuhi level kinerja yang diinginkan yaitu *life safety*.

- Sendi plastis yang terjadi pada struktu untuk arah X, muncul di kolom 20x30 yang dimana kolom tersebut hanya memikul lantai mezzanine. Sedangkan untuk kolom 35x50 arah X belum mengalami plastifikasi pada daerah sendi plastis nya, yang artinya pembacaan kapasitas struktur belum terbaca sepenuhnya, akibat kondisi kritis yang terjadi pada kolom 20x30. Sedangkan untuk arah Y kondisi sendi plastis yang terjadi secara menyeluruh terjadi pada kolom, dan dapat diasumsi kan bahwa struktur dapat mengalami keruntuhan jika terjadi gempa rencana. Oleh sebab itu struktur harus diberi perkuatan terhadap kolom nya.
- Hasil nilai parameter respon aktual hasil DDBD memiliki nilai yang berbeda dengan nilai yang tercantum dalam SNI 1726:2019, tetapi nilai – nilai tersebut hampir mendekati dengan nilai – nilai parameter respon struktur dalam SNI 1726:2019 sehingga dapat disimpulkan metode DDBD akan menjadi suatu alternatif yang bisa digunakan terlebih jika seorang desainer ingin mendesain suatu struktur dan ingin mengetahui performa struktur tersebut pada taraf kinerjanya.

7. Referensi

- American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE 7-16 Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers.
- Applied Technology Council. (1996). *ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI-1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI-1727-2020 Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*.
- Dewobroto, W. (2005). *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover*. Universitas Pelita Harapan.
- Ertanto, B. C., Satyarno, I., & Suhendro, B. (2017). Performance Based Design Bangunan Gedung Untuk Level Kinerja Operasional. *Inersia: Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 13(2), 189–204.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *FEMA-356 Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*.
- Federal Emergency Management Agency. (2005). *FEMA-440 Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*.
- Federal Emergency Management Agency. (2006). *FEMA-451 NEHRP Recommended Provisions: Design Examples*.
- Lumbantobing, T. (2016). *Evaluasi Kinerja Struktur pada Bangunan Bertingkat dengan Pushover Analysis* [Skripsi]. Universitas Katolik Santo Thomas.
- Pranata, Y. A. (2006). Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa dengan Pushover Analysis (Sesuai ATC-40, FEMA 356 dan FEMA 440). *Jurnal Teknik Sipil*, 3(1), 41–52.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). Direct displacement-based seismic design of structures. *NZSEE Conference*, 1–23.
- Sudibyakto, H. A. (2018). *Manajemen bencana di Indonesia ke mana?* UGM Press.
- Tavio, U. W. (2018). *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (Performance Based Design)*. Yogyakarta: Andi.

JURNAL REKAYASA KONSTRUKSI MEKANIKA SIPIL

Analisis Struktur Beton Bertulang dengan Sistem Flat Slab Dilengkapi Drop Panel pada Bangunan Bertingkat

Imanuel Lurybson ZEGA, Martius GINTING, Simon Dertha TARIGAN

Aplikasi Metode Performance Based Design dalam Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Beton 6 Lantai

Arie Sempana SURBAKTI, Martius GINTING, Samsuardi BATUBARA

Perencanaan Pondasi Setapak Gabungan dan Pondasi Rakit Sederhana pada Proyek Orangutan Haven Sumatera Utara

Elbert Chardi UTOMO, Johannes TARIGAN

Pembatasan dalam Pemanfaatan Air Hasil Daur Ulang IPAL pada Universitas Vittorio Kurniawan, Widodo Kushartomo, Kevin

Analisis Karakteristik Curah Hujan Kota Medan Bagian Utara dengan Menggunakan 3 Data Stasiun Hujan

Henry Muliadi NABABAN, Binsar SILITONGA, Reynaldo SIAHAAN

Analisis Tingkat Kepuasan Penyedia Jasa Konstruksi/Konsultansi terhadap Pelaksanaan Pengadaan Secara Elektronik (e-Procurement) pada ULP Kabupaten Halmahera Selatan

Friyani N. ARIF, Mufti Amir SULTAN, Muhammad Taufiq Yuda SAPUTRA, Amiruddin Hi MUHAMMAD



Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)

Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS) Fakultas Teknik Universitas Katolik Santo Thomas berisi artikel-artikel ilmiah yang meliputi kajian di bidang teknik khususnya Teknik Sipil, seperti matematika teknik, mekanika teknik, analisis struktur, konstruksi baja, konstruksi beton, konstruksi kayu, konstruksi gelas, mekanika tanah, teknik pondasi, hidrologi, hidrolika, bangunan air, manajemen konstruksi, dinamika struktur, *earthquake engineering*, sistem dan rekayasa transportasi, ilmu ukur tanah, struktur bangunan sipil, rekayasa jalan raya, serta penelitian-penelitian lain yang terkait dengan bidang-bidang tersebut.

Terbit dalam 2 (dua) kali setahun yaitu pada bulan April dan September

Penasihat :

Rektor Universitas Katolik Santo Thomas

Ketua Penyunting (Editor in Chief) :

Ir. Oloan Sitohang, M.T. (Universitas Katolik Santo Thomas)

Manajer Penyunting (Managing Editor):

Reynaldo, S.T., M.Eng. (Universitas Katolik Santo Thomas)

Anggota Penyunting (Editorial Board):

Dr.-Ing. Sofyan, S.T, M.T. (Universitas Malikussaleh)

Dr. Dwi Phalita Uphita (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi)

Samsuardi Batubara, S.T., M.T. (Universitas Katolik Santo Thomas)

Dr. Janner Simarmata (Universitas Negeri Medan)

Mitra Bestari (Peer Reviewer):

Dr.Eng. Ir. Aleksander Purba, S.T., M.T., IPM, ASEAN Eng. (Universitas Lampung, Indonesia)

Ir. Binsar Silitonga, M.T. (Universitas Katolik Santo Thomas, Indonesia)

Budi Hasiholan, S.T., M.T., Ph.D (Institut Teknologi Bandung, Indonesia)

Ir. Charles Sitindaon, M.T. (Universitas Katolik Santo Thomas, Indonesia)

Dr. Erica Elice Uy (De La Salle University, Philippines)

Dr. Ernesto Silitonga, S.T, D.E.A. (Universitas Negeri Medan, Indonesia)

Prof. Dr-Ing. Johannes Tarigan (Universitas Sumatera Utara, Indonesia)

Dr. Linda Prasetyorini (Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia)

Ir. Martius Ginting, M.T. (Universitas Katolik Santo Thomas)

Dr.Eng. Mia Wimala (Universitas Katolik Parahyangan, Indonesia)

Dr.Eng. Minson Simatupang (Universitas Halu Oleo, Indonesia)

Dr. Mochamad Raditya Pradana (Keppel Marine and Deepwater Technology, Singapura)

Dr. Ir. Shirley Susanne Lumeno, S.T., M.T. (Universitas Negeri Manado, Indonesia)

Dr. Senot Sangadji (Universitas Sebelas Maret, Indonesia)

Ir. Simon Dertha, M.T. (Universitas Katolik Santo Thomas, Indonesia)

Dr. Thi Nguyễn Cao (Tien Giang University, Viet Nam)

Ilustrator Sampul:

Yulianto, ST., M.Eng (Universitas Katolik Santo Thomas, Indonesia)

Penerbit & Alamat Redaksi:

Fakultas Teknik Universitas Katolik Santo Thomas

Jl. Setiabudi No. 479-F Tanjung Sari, Medan 20132

Telp. (061) 8210161 Fax : (061) 8213269

email : sipil@ust.ac.id

Konten

REKAYASA STRUKTUR	hal.
Analisis Struktur Beton Bertulang dengan Sistem Flat Slab Dilengkapi Drop Panel pada Bangunan Bertingkat	57-67
<i>Immanuel Lurybson ZEGA, Martius GINTING, Simon Dertha TARIGAN</i>	
Aplikasi Metode Performance Based Design dalam Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Beton 6 Lantai	69-79
<i>Arie Sempana SURBAKTI, Martius GINTING, Samsuardi BATUBARA</i>	
REKAYASA GEOTEKNIK	
Perencanaan Pondasi Setapak Gabungan dan Pondasi Rakit Sederhana pada Proyek Orangutan Haven Sumatera Utara	81-95
<i>Elbert Chardi UTOMO, Johannes TARIGAN</i>	
TEKNIK SUMBER DAYA AIR	
Pembatasan dalam Pemanfaatan Air Hasil Daur Ulang IPAL pada Universitas	97-105
<i>Vittorio Kurniawan, Widodo Kushartomo, Kevin</i>	
Analisis Karakteristik Curah Hujan Kota Medan Bagian Utara dengan Menggunakan 3 Data Stasiun Hujan	107-118
<i>Henry Muliadi NABABAN, Binsar SILITONGA, Reynaldo SIAHAAN</i>	
MANAJEMEN KONSTRUKSI	
Analisis Tingkat Kepuasan Penyedia Jasa Konstruksi/Konsultansi terhadap Pelaksanaan Pengadaan Secara Elektronik (e-Procurement) pada ULP Kabupaten Halmahera Selatan	119-132
<i>Friyani N. ARIF, Mufti Amir SULTAN, Muhammad Taufiq Yuda SAPUTRA, Amiruddin Hi MUHAMMAD</i>	

Pengantar Redaksi

Puji dan syukur kami sampaikan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas kasih karuniaNYA kami dapat menyelesaikan penerbitan Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS) Volume 6 Nomor 2 di bulan Oktober tahun 2023 ini. Pada edisi ini, telah diterbitkan 6 artikel yang telah melewati proses *peer-review* dan penyuntingan artikel. Keenam artikel tersebut terdiri atas 2 (dua) artikel dalam topik Rekayasa Struktur, 1 (satu) artikel dalam topik Rekayasa Geoteknik, 2 (dua) artikel dalam topik Teknik Sumber Daya Air, dan 1 (satu) artikel dengan topik Manajemen Konstruksi.

Dewan redaksi menyampaikan apresiasi tinggi kepada para penulis yang karyanya diterbitkan pada volume ini, atas kerja samanya merespon komentar dan rekomendasi dari tim editorial dan mitra bestari. Ungkapan terima kasih juga kami sampaikan kepada para mitra bestari atas kontribusi dukungannya dan kesediaannya menyambut permintaan kami untuk menelaah karya ilmiah yang masuk.

Sebagai penutup, kami memiliki harapan bahwa JRKMS semakin bermanfaat dalam dunia ketekniksipilan di Indonesia, serta menjadi pilihan bagi seluruh kalangan (akademisi, praktisi, mahasiswa, dsb.) untuk mempublikasikan dan memasarkan karya tulisnya untuk dinikmati secara luas.

Salam hangat dan Salam sehat.

Medan, Oktober 2023

Tim Editorial



JURNAL REKAYASA KONSTRUKSI MEKANIKA SIPIL
| Volume 6 | Nomor 2 | Oktober 2023 |

Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Santo Thomas
<https://doi.org/10.54367>



9 772614 570002