

PENGARUH DILATASI TERHADAP KINERJA STRUKTUR BANGUNAN DENGAN KETIDAKBERATURAN HORIZONTAL MENGGUNAKAN ANALISIS PUSHOVER

Muarif Naqa' Ibtihal¹, Yehezkiel Septian Yoganata², Agus Sugiarto³,

Mahasiswa Program Studi D-IV Manajemen Rekayasa Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang ¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang², Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang³

Email: muarifnaqaibtihal@gmail.com ¹, yehezkielseptian@polinema.ac.id ², agus.sugiarto@polinema.ac.id ³

ABSTRAK

Bangunan dengan ketidakberaturan horizontal memiliki kerentanan terhadap respons seismik. Salah satu sistem yang umum diterapkan pada bangunan tersebut adalah sistem dilatasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penerapan sistem dilatasi terhadap kinerja struktur pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal. Objek penelitian berupa gedung 6 lantai dengan konfigurasi bentuk L dan T yang dimodelkan dalam kondisi tanpa dilatasi dan dilatasi. Evaluasi kinerja dilakukan melalui analisis *pushover* berdasarkan metode kapasitas spektrum (ATC-40) dan koefisien perpindahan (FEMA-440) menggunakan bantuan *software* analisis struktur 3D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan dilatasi menurunkan kebutuhan penulangan sebesar 5,09% pada konfigurasi L dan 3,73% pada konfigurasi T. Berdasarkan kurva kapasitas, dilatasi menurunkan gaya geser dasar maksimum sebesar 38,28–59,44% pada konfigurasi L dan 20,34–69,64% pada konfigurasi T, disertai respons perpindahan yang bervariasi akibat perubahan kekakuan dan kapasitas lateral tiap blok. Selanjutnya, berdasarkan analisis titik kinerja (ATC-40) pada kedua konfigurasi, model dilatasi menunjukkan peningkatan tingkat kinerja dari *Damage Control* menjadi *Immediate Occupancy* ditinjau dari simpangan maksimum. Sedangkan, berdasarkan hasil analisis target perpindahan (FEMA-440), model dilatasi menunjukkan peningkatan tingkat kinerja dari *Life Safety* menjadi *Immediate Occupancy* ditinjau dari simpangan inelastik maksimum. Jarak dilatasi yang dibutuhkan sebesar 375 mm. Dari segi biaya pekerjaan struktur, penerapan dilatasi menurunkan total biaya pekerjaan struktur sebesar 3,27% pada konfigurasi L dan 2,30% pada konfigurasi T. Secara keseluruhan, penerapan sistem dilatasi meningkatkan kinerja struktur dan menurunkan biaya pekerjaan struktur pada model yang ditinjau.

Kata Kunci: dilatasi; ketidakberaturan horizontal; analisis *pushover*; kinerja struktur

ABSTRACT

Buildings with horizontal irregularities are vulnerable to seismic response. One system commonly applied to such buildings is the dilatation system. This study aims to analyze the effect of applying a dilatation system on the structural performance of buildings with horizontal irregularities. The object of research is a 6-story building with L-shaped and T-shaped plan configurations, each modeled both without and with dilatation. Performance was evaluated through pushover analysis based on the capacity spectrum method (ATC-40) and the displacement coefficient method (FEMA-440), using 3D structural analysis software. Results show that applying dilatation reduced required reinforcement by 5.09% for the L configuration and 3.73% for the T configuration. Based on the capacity curves, dilatation reduced maximum base shear by 38.28–59.44% for the L configuration and 20.34–69.64% for the T configuration, accompanied by varying displacement responses due to changes in the stiffness and lateral capacity of each block. Performance point analysis for both configurations showed that the dilatation model improved performance level from Damage Control to Immediate Occupancy in terms of maximum drift, while target displacement analysis showed an improvement from Life Safety to Immediate Occupancy in terms of maximum inelastic drift. The required dilatation gap width was 375 mm. In terms of structural work cost, dilatation reduced total cost by 3.27% for the L configuration and 2.30% for the T configuration. Overall, the dilatation system was proven to improve structural performance and reduce structural work cost in the models reviewed.

Keywords: dilatation; horizontal irregularities; pushover analysis; structural performance

1. PENDAHULUAN

Perkembangan pembangunan gedung bertingkat di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi menuntut adanya perencanaan struktur yang mampu memberikan kinerja seismik yang andal. Indonesia sebagai negara yang berada pada zona pertemuan tiga lempeng tektonik utama memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi [1][2]. Oleh karena itu, perencanaan bangunan di Indonesia perlu menerapkan struktur tahan gempa untuk mengurangi risiko kerusakan akibat gempa bumi. Di sisi lain, kebutuhan efisiensi lahan dan tuntutan arsitektural menyebabkan banyak bangunan dirancang dengan bentuk tidak beraturan [3]. Salah satu bentuk bangunan gedung yang umum ditemukan adalah bangunan dengan ketidakberaturan denah yang dapat dikategorikan sebagai ketidakberaturan horizontal. Bangunan dengan ketidakberaturan denah cenderung mengalami kerentanan seismik yang lebih tinggi dibandingkan bangunan beraturan [4]. Salah satu sistem yang sering ditemukan pada bangunan yang mengalami ketidakberaturan horizontal adalah sistem dilatasi.

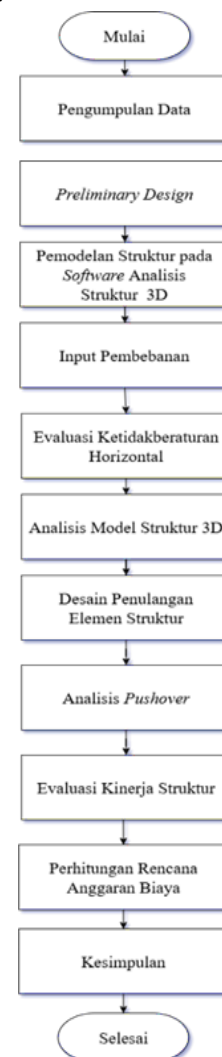
Dilatasi adalah penerapan sistem pembagian sebuah bangunan tidak beraturan menjadi beberapa bagian bangunan yang beraturan [5]. Penerapan dilatasi tentunya akan berpengaruh terhadap kinerja struktur bangunan dengan ketidakberaturan horizontal. Salah satu metode analisis yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan adalah metode analisis *pushover*. Analisis tersebut umumnya dilakukan untuk evaluasi kinerja struktur dikarenakan mampu menggambarkan perilaku inelastis struktur secara efektif dan efisien [6]. Penelitian yang dilakukan oleh [7] menunjukkan bahwa bangunan yang menggunakan sistem dilatasi memiliki kinerja struktur yang lebih baik dibandingkan bangunan tanpa dilatasi berdasarkan analisis *pushover*. Namun, tingkat efektivitas penerapan dilatasi tersebut dipengaruhi oleh bentuk konfigurasi bangunan serta kondisi ketidakberaturan struktur yang ada.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini merumuskan permasalahan mengenai pengaruh penerapan dilatasi terhadap kinerja struktur berdasarkan analisis *pushover* (metode kapasitas spektrum ATC-40 dan target perpindahan FEMA-440) serta biaya pekerjaan struktur pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal.

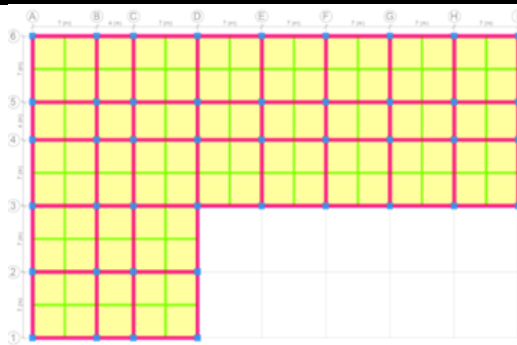
2. METODE

Data penelitian yang digunakan dalam studi ini meliputi deskripsi lokasi objek penelitian, spesifikasi teknis bangunan, serta parameter yang digunakan dalam perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB). Objek penelitian berlokasi di Kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta yang merupakan wilayah dengan tingkat kerawanan gempa tinggi di Indonesia. Kondisi tanah pada lokasi penelitian termasuk kategori tanah sedang (SD).

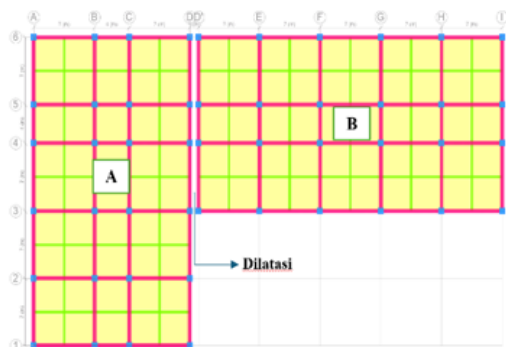
Bangunan yang dianalisis berfungsi sebagai gedung perkantoran dengan konfigurasi denah berbentuk L dan T yang dimodelkan dalam dua kondisi, yaitu tanpa dilatasi (TDL dan TDT) dan dengan dilatasi (DDL dan DDT). Untuk kondisi dengan dilatasi nantinya akan terbagi menjadi 2 blok yaitu blok (a) dan blok (b). Bangunan ini terdiri dari 6 lantai dan atap dengan tinggi total 24 meter, serta tinggi antar lantai sebesar 4 meter. Struktur bangunan menggunakan beton bertulang dengan material yang digunakan meliputi beton dengan mutu f'_c 30 MPa untuk pelat dan balok, serta f'_c 35 MPa untuk kolom, sedangkan mutu baja tulangan yang digunakan adalah f_y 420 MPa. Parameter-parameter yang digunakan dalam perhitungan RAB yaitu analisis harga satuan pekerjaan (AHSP) berdasarkan surat edaran direktur jenderal bina konstruksi nomor 182/SE/Dk/2025. Analisis dilakukan menggunakan bantuan *software* analisis struktur 3D berbasis komputer. Selanjutnya akan disajikan diagram alir (*flowchart*) yang menggambarkan tahapan penelitian secara garis besar.



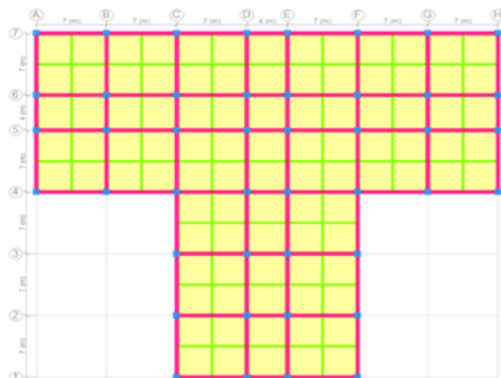
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian
Sumber : Dokumen Pribadi



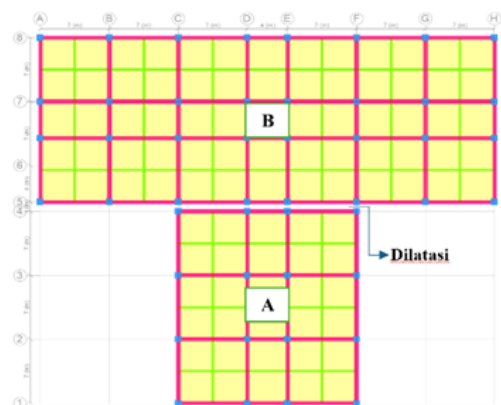
Gambar 2. Model TDL (Tanpa Dilatasi Bentuk L)
Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 3. Model DDL (Dilatasi Bentuk L)
Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 4. Model TDT (Tanpa Dilatasi Bentuk T)
Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 5. Model DDT (Dilatasi Bentuk T)

Sumber : Dokumen Pribadi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan membahas hasil analisis dan pembahasan penelitian secara keseluruhan berdasarkan tahapan yang telah dilakukan.

Preliminary Design

Pada tahap ini dilakukan *preliminary design* terhadap model yang akan dianalisis dan dikontrol sesuai ketentuan SNI 2847-2019 [8]. Berdasarkan hasil *preliminary design* tersebut, diperoleh dimensi elemen struktur yang meliputi pelat, balok, dan kolom sebagai berikut :

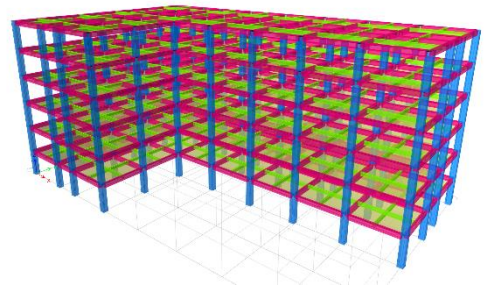
Tabel 1. Rekapitulasi Hasil *Preliminary Design*

Elemen Struktur	Dimensi
Kolom	700/700 mm
Balok Induk	400/600 mm
Balok Anak	250/450 mm
Pelat Lantai	120 mm

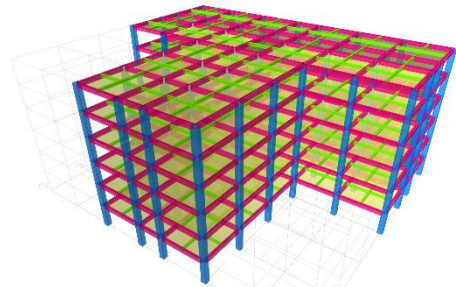
Sumber : Hasil Analisis

Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dilakukan menggunakan *software* analisis struktur 3D. Model struktur disusun sesuai data geometri bangunan, dimensi elemen struktur, dan material yang digunakan.



Gambar 6. Pemodelan Struktur Konfigurasi Bentuk L
Sumber : *Software* Analisis Struktur 3D



Gambar 7. Pemodelan Struktur Konfigurasi Bentuk T
Sumber : *Software* Analisis Struktur 3D

Pembebanan

Pembebanan struktur dalam analisis mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur

Bangunan Gedung dan Nongedung [9] dan SNI 1727-2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung [10].

a. Beban Mati

Beban mati yang digunakan pada analisis meliputi beban mati struktur sendiri (*self weight*) dan beban mati tambahan. Berikut adalah beban mati tambahan yang digunakan pada analisis :

Tabel 2. Rekapitulasi Beban Mati Tambahan

Komponen	Beban / Berat Jenis	Satuan
Plafond Gypsum	0,008	kN/m ²
Rangka Plafon	0,10	kN/m ²
Waterproofing	0,07	kN/m ²
Keramik + Spesi	1,10	kN/m ²
MEP	0,19 – 0,25	kN/m ²
Dinding	5,89	kN/m ³

Sumber : SNI 1727-2020

b. Beban Hidup

Beban hidup yang digunakan pada analisis meliputi beban untuk ruang kantor, koridor, dan atap.

Tabel 3. Rekapitulasi Beban Hidup

Komponen	Beban Hidup (kN/m ²)	Beban Hidup Tereduksi (kN/m ²)
Ruang Kantor	2,40	2,17
Koridor	4,79	2,54
Atap	0,96	0,58

Sumber : SNI 1727-2020

c. Beban Air Hujan

Beban air hujan yang digunakan pada analisis sebesar 0,245 kN/m² yang dihitung sesuai SNI 1727-2020 [10].

d. Beban Gempa

Beban gempa yang digunakan mengacu pada ketentuan SNI 1726-2019 [9]. Penentuan parameter dan pembebanan gempa dilakukan sesuai dengan persyaratan dalam standar tersebut, yang selanjutnya dijabarkan sebagai berikut :

- Parameter beban gempa

Berikut adalah parameter gempa yang digunakan pada analisis ini :

Tabel 4. Parameter Beban Gempa

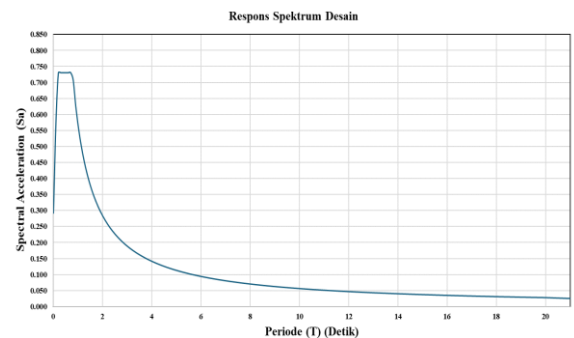
Parameter	Nilai / Keterangan
Lokasi	Sleman, Yogyakarta
Fungsi Bangunan	Perkantoran
Kategori Resiko	II
Ss	0,995
S1	0,463
Fa	1,10
Fv	1,84
Kelas Situs Tanah	D
Sds	0,731
Sd1	0,567
KDS	D

T0	0,16
Ts	0,78
TL	20

Sumber : Hasil Analisis

- Kurva respons spektrum

Berdasarkan parameter gempa, selanjutnya akan menghasilkan kurva respons spektrum sebagaimana pada gambar berikut :



Gambar 8. Kurva Respons Spektrum

Sumber : Hasil Analisis

- Berat Seismik efektif (W)

Berikut adalah rekapitulasi dari berat seismik efektif dari masing-masing model yang dianalisis :

Tabel 5. Berat Seismik Efektif

Model	W (kN)
TDL	69.736,36
DDL (a)	34.405,92
DDL (b)	36.914,85
TDT	69.736,36
DDT (a)	23.008,85
DDT (b)	48.311,92

Sumber :Hasil Analisis

Evaluasi Ketidakberaturan Horizontal

Evaluasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi ketidakberaturan horizontal yang terjadi pada struktur bangunan. Evaluasi ketidakberaturan horizontal dilakukan dengan mengacu pada ketentuan SNI 1726-2019 [9]. Berikut adalah rekapitulasi terkait ketidakberaturan horizontal pada model yang dianalisis :

Tabel 6. Rekapitulasi Evaluasi Ketidakberaturan Horizontal

Model	Tipe 1a	Tipe 1b	Tipe 2	Tipe 3	Tipe 4	Tipe 5
TDL	-	-	✓	-	-	-
DDL (a)	-	-	-	-	-	-
DDL (b)	-	-	-	-	-	-
TDT	-	-	✓	-	-	-
DDT (a)	-	-	-	-	-	-
DDT (b)	-	-	-	-	-	-

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan Tabel 6, model tanpa dilatasi pada konfigurasi L (TDL) dan T (TDT) mengalami

ketidakberaturan horizontal Tipe 2, yaitu ketidakberaturan sudut dalam. Sementara itu, setelah penerapan dilatasi, model DDL (a), DDL (b), DDT (a), dan DDT (b) tidak mengalami ketidakberaturan horizontal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemisahan struktur menjadi beberapa blok melalui sistem dilatasi menghilangkan ketidakberaturan sudut dalam pada model bangunan yang ditinjau.

Desain Penulangan Elemen Struktur

Setelah *preliminary design* dan perhitungan pembebanan, tahap berikutnya adalah analisis model struktur 3D menggunakan bantuan *software* untuk memperoleh gaya dalam sebagai dasar desain elemen struktur. Berdasarkan hasil desain penulangan yang sesuai dengan SNI 2847-2019 [8], didapatkan hasil penulangan pada elemen struktur yang ditinjau sebagai berikut :

a. Pelat Lantai

Rekapitulasi hasil perhitungan desain tulangan pelat lantai pada seluruh model disajikan pada tabel berikut :

Tabel 7. Rekapitulasi Tulangan Pelat Lantai

Model	Tulangan atas	Tulangan bawah
TDL	D10-250	D10-250
DDL (a)	D10-250	D10-250
DDL (b)	D10-250	D10-250
TDT	D10-250	D10-250
DDT (a)	D10-250	D10-250
DDT (b)	D10-250	D10-250

Sumber : Hasil Analisis

b. Balok Induk

Rekapitulasi hasil perhitungan desain tulangan balok induk pada seluruh model disajikan pada tabel berikut :

Tabel 8. Rekapitulasi Tulangan Utama Balok Induk

Model	Tulangan atas		Tulangan bawah	
	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
TDL	8D22	5D22	5D22	7D22
DDL (a)	7D22	4D22	4D22	6D22
DDL (b)	7D22	4D22	4D22	6D22
TDT	8D22	5D22	5D22	7D22
DDT (a)	7D22	4D22	4D22	6D22
DDT (b)	7D22	4D22	4D22	6D22

Sumber : Hasil Analisis

Tabel 9. Rekapitulasi Tulangan Geser Balok Induk

Model	Tumpuan	Lapangan
Semua Model	3D10-100	3D10-150

Sumber : Hasil Analisis

c. Balok Anak

Rekapitulasi hasil perhitungan desain tulangan balok anak pada seluruh model disajikan pada tabel berikut :

Tabel 10. Rekapitulasi Tulangan Utama Balok Anak

Model	Tulangan atas		Tulangan bawah	
	Tump.	Lap.	Tump.	Lap.
Semua Model	2D22	2D22	2D22	2D22

Sumber : Hasil Analisis

Tabel 11. Rekapitulasi Tulangan Geser Balok Anak

Model	Tumpuan	Lapangan
Semua Model	D10-200	D10-250

Sumber : Hasil Analisis

d. Kolom

Rekapitulasi hasil perhitungan desain tulangan kolom pada seluruh model disajikan pada tabel berikut :

Tabel 12. Rekapitulasi Tulangan Kolom

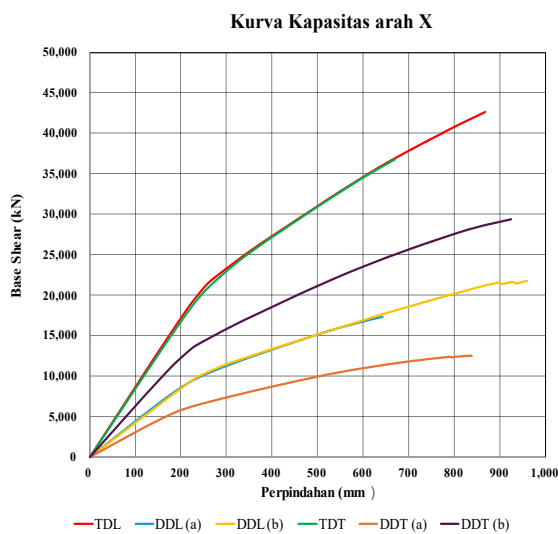
Model	Tul. Utama	Tul. Geser	
		Tumpuan	Lapangan
TDL	24D25	4D10-100	4D10-100
DDL (a)	20D25	4D10-100	4D10-100
DDL (b)	20D25	4D10-100	4D10-100
TDT	24D25	4D10-100	4D10-100
DDT (a)	20D25	4D10-100	4D10-100
DDT (b)	20D25	4D10-100	4D10-100

Sumber : Hasil Analisis

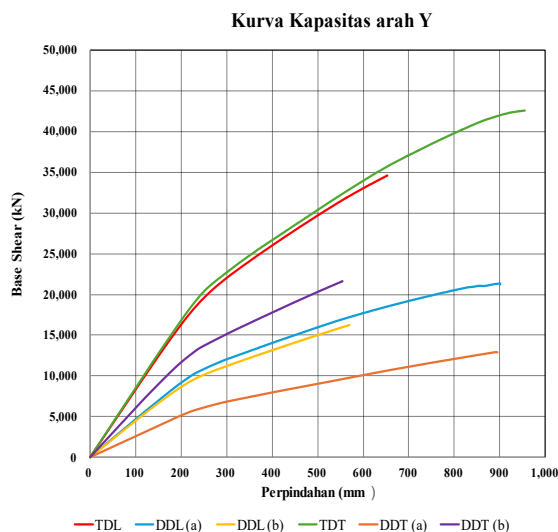
Berdasarkan hasil desain penulangan elemen struktur, selanjutnya akan ditinjau kuantitas kebutuhan penulangan dari masing-masing model. Penerapan dilatasi tidak memengaruhi total kebutuhan penulangan pelat lantai, yaitu tetap sebesar 71.419,32 kg pada kedua konfigurasi. Sebaliknya, dilatasi menurunkan kebutuhan penulangan balok dari 177.178,43 kg menjadi 164.532,23 kg (7,14%) pada konfigurasi L, dan dari 177.182,72 kg menjadi 170.155,88 kg (3,97%) pada konfigurasi T. Kebutuhan penulangan kolom juga menurun dari 164.811,29 kg menjadi 156.428,02 kg (5,09%) pada kedua konfigurasi. Penurunan ini terjadi karena dilatasi membagi bangunan menjadi blok-blok independen, sehingga gaya dalam pada balok dan kolom menurun dibandingkan tanpa dilatasi.

Kurva Kapasitas

Setelah penulangan elemen struktur ditentukan, selanjutnya dilakukan analisis *pushover* menggunakan *software* analisis struktur 3D yang menghasilkan kurva kapasitas, yaitu kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap sebagai representasi sifat nonlinier struktur dalam menahan beban lateral hingga mencapai kondisi inelastik [11].



Gambar 9. Kurva Kapasitas Arah X
Sumber : Hasil Analisis



Gambar 10. Kurva Kapasitas Arah Y
Sumber : Hasil Analisis

Selanjutnya akan disajikan terkait rekapitulasi gaya geser dasar maksimum dan perpindahan maksimum berdasarkan kurva kapasitas pada masing-masing model yang dianalisis :

Tabel 13. Nilai Perpindahan Maksimum dan Gaya Geser Maksimum pada Kurva Kapasitas Arah X

Model	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (kN)
TDL	867,22	42.604,04
DDL (a)	642,50	17.279,78
DDL (b)	960,00	21.802,64
TDT	670,69	36.831,62
DDT (a)	839,08	12.509,23
DDT (b)	924,31	29.341,02

Sumber : Hasil Analisis

Tabel 14. Nilai Perpindahan Maksimum dan Gaya Geser Maksimum pada Kurva Kapasitas Arah Y

Model	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (kN)
-------	------------------	-----------------

TDL	653,03	34.595,99
DDL (a)	900,26	21.351,24
DDL (b)	570,41	16.264,23
TDT	954,85	42.546,47
DDT (a)	894,42	12.919,04
DDT (b)	555,22	21.591,51

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan Gambar 9, Gambar 10, Tabel 13, dan Tabel 14, penerapan dilatasi pada konfigurasi bentuk L menurunkan gaya geser dasar maksimum sebesar 38,28%–59,44% dibandingkan model TDL. Sementara itu, perpindahan maksimum menunjukkan respons yang bervariasi, yaitu pada arah X menurun 25,91% pada model DDL (a) dan meningkat 10,70% pada model DDL (b), sedangkan pada arah Y meningkat 37,86% pada model DDL (a) dan menurun 12,65% pada model DDL (b) dibandingkan model TDL. Hasil analisis kurva kapasitas pada konfigurasi bentuk T menunjukkan bahwa penerapan dilatasi menurunkan gaya geser dasar maksimum sebesar 20,34%–69,64% dibandingkan model TDT. Sementara itu, perpindahan maksimum menunjukkan respons yang bervariasi, yaitu pada arah X meningkat 25,11% pada model DDT (a) dan 37,82% pada model DDT (b), sedangkan pada arah Y menurun 6,33% pada model DDT (a) dan 41,85% pada model DDT (b) dibandingkan model TDT.

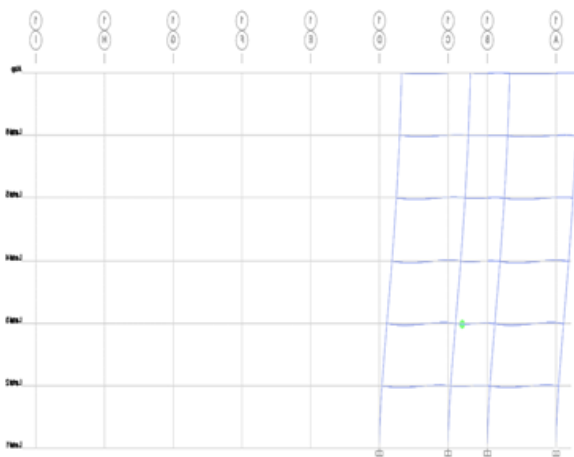
Perubahan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan ini turut menunjukkan bahwa dilatasi juga berpengaruh terhadap kekakuan struktur pada tiap blok. Dengan demikian, penerapan dilatasi berpengaruh terhadap penurunan kapasitas struktur dalam menahan gaya lateral, serta menghasilkan variasi perpindahan maksimum yang bergantung pada karakteristik masing-masing blok dan arah pembebanan.

Mekanisme Sendi Plastis

Sendi plastis merupakan keadaan pada ujung elemen struktur yang semula *rigid* (kaku) berubah menjadi *pinned* (sendi) dikarenakan ketidakmampuan struktur menahan beban [12]. Evaluasi mekanisme sendi plastis dilakukan dengan mengamati pola dan urutan terbentuknya pada elemen balok dan kolom selama pembebanan untuk menilai mekanisme keruntuhan struktur serta kesesuaiannya dengan konsep *strong column weak beam* (SCWB). Selanjutnya akan ditampilkan contoh hasil evaluasi mekanisme sendi plastis pada salah satu model dilatasi yaitu DDL (a) pada arah X :

1. Sendi plastis pertama kali terjadi.

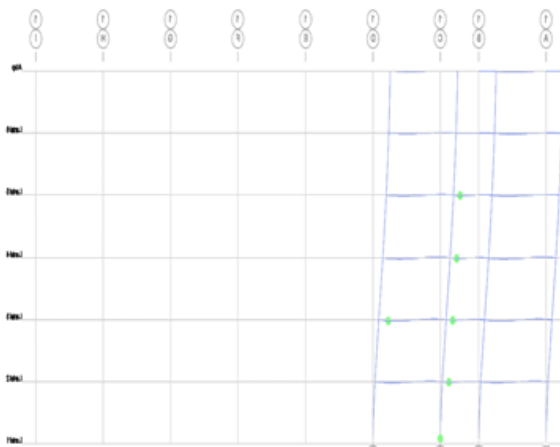
Pada arah X, sendi plastis awal terjadi pada balok di Grid 1 pada step 16 dengan gaya geser dasar sebesar 4.386,43 kN dan perpindahan 99,40 mm.



Gambar 11. Sendi Plastis Pertama Arah X DDL (a)
Sumber : *Software Analisis Struktur 3D*

2. Sendi plastis terjadi pada kolom.

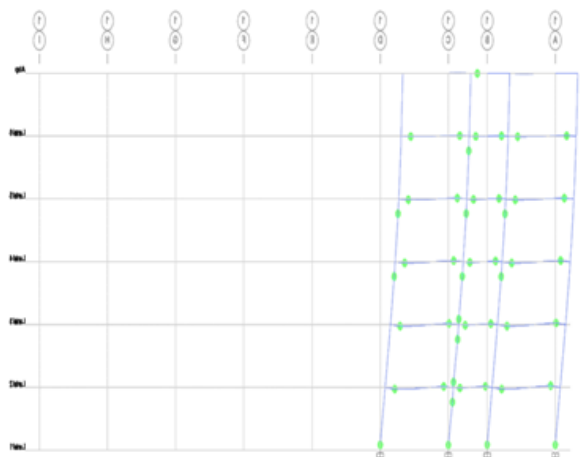
Pada arah X setelah terjadi sendi plastis pada balok kemudian diikuti terjadinya sendi plastis pada kolom Grid 1 pada step 23 dengan gaya geser dasar sebesar 6.868,98 kN dan perpindahan 157,07 mm.



Gambar 12. Sendi Plastis pada Kolom Arah X DDL (a)
Sumber : *Software Analisis Struktur 3D*

3. Sendi Plastis pada tahap akhir pembebanan.

Pada arah X, sendi plastis yang terjadi pada tahap akhir pembebanan, struktur mencapai gaya geser dasar maksimum sebesar 17.279,78 kN dan perpindahan sebesar 642,50 mm.

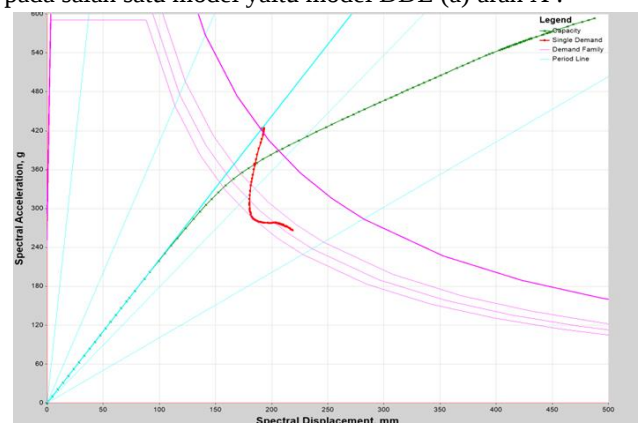


Gambar 13. Sendi Plastis pada Tahap Akhir Pembebanan Arah X DDL (a)
Sumber : *Software Analisis Struktur 3D*

Berdasarkan hasil analisis mekanisme sendi plastis, seluruh model pada bentuk L atau T dengan kondisi dilatasi atau tanpa dilatasi menunjukkan pola yang daktail dengan terbentuk pertama kali pada balok kemudian berkembang ke kolom, sehingga memenuhi konsep *strong column weak beam* (SCWB).

Titik Kinerja Metode Kapasitas Spektrum (ATC-40)

Metode ini dilakukan dengan mengubah kurva kapasitas hasil analisis *pushover* ke dalam format ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectrum*), kemudian dibandingkan dengan *demand spectrum* gempa rencana. Kurva kapasitas dalam format ADRS merepresentasikan kemampuan struktur dalam menahan beban gempa, sedangkan demand spectrum menggambarkan kebutuhan respons struktur akibat pengaruh gempa rencana pada lokasi yang ditinjau. Titik perpotongan antara kapasitas spektrum dan *demand spectrum* disebut sebagai *performance point*, yang menunjukkan kondisi keseimbangan antara kapasitas dan kebutuhan gempa [13]. Selanjut akan ditampilkan contoh hasil analisis titik kinerja dari *software* analisis struktur 3D pada salah satu model yaitu model DDL (a) arah X :



Gambar 14. Grafik Kurva Kapasitas Spektrum Arah X Model DDL (a)

Sumber : *Software Analisis Struktur 3D*

Selanjutnya akan disajikan tabel rekapitulasi parameter titik kinerja metode kapasitas spektrum (ATC-40) dari masing-masing model struktur :

Tabel 15. *Performance Point* (ATC-40) Arah X

Model	<i>Performance Point</i> Arah X	
	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (kN)
TDL	256,957	21.327,011
DDL (a)	250,134	10.092,443
DDL (b)	262,373	10.606,922
TDT	260,582	20.986,714
DDT (a)	233,625	6.391,939
DDT (b)	244,619	14.139,740

Sumber : Hasil Analisis

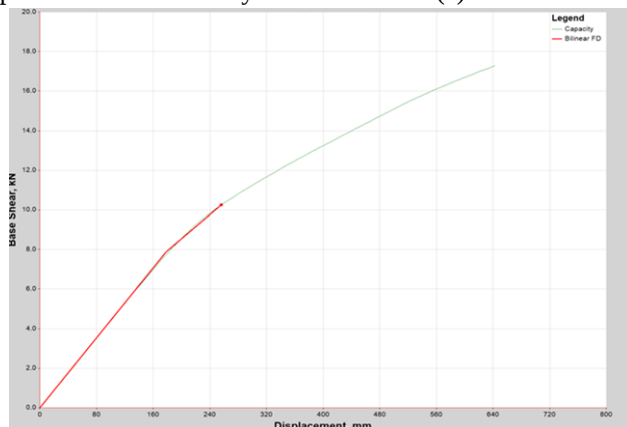
Tabel 16. *Performance Point* (ATC-40) Arah Y

Model	<i>Performance Point</i> Arah Y	
	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (kN)
TDL	261,065	20.167,727
DDL (a)	239,995	10.639,982
DDL (b)	256,772	10.299,593
TDT	258,633	20.816,234
DDT (a)	263,521	6.321,912
DDT (b)	251,687	13.713,296

Sumber : Hasil Analisis

Target Perpindahan Metode Koefisien Perpindahan FEMA-440

Evaluasi dilakukan dengan memanfaatkan kurva kapasitas yang diperoleh dari hasil analisis *pushover*, yaitu hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan atap (*roof displacement*) yang menunjukkan kapasitas struktur dalam menahan beban lateral hingga mencapai kondisi pasca-elastis. Selanjutnya, kurva kapasitas tersebut diidealisasikan menjadi kurva bilinear untuk merepresentasikan perilaku struktur secara lebih sederhana tanpa menghilangkan karakteristik utama respons inelastiknya [14]. Selanjutnya akan ditampilkan contoh hasil analisis target perpindahan dari *software* analisis struktur 3D pada salah satu model yaitu model DDL (a) arah X :



Gambar 15. Grafik Kurva Target Perpindahan Arah X Model DDL (a)

Sumber : *Software Analisis Struktur 3D*

Selanjutnya akan disajikan tabel rekapitulasi parameter target perpindahan metode koefisien perpindahan (FEMA-440) dari masing-masing model struktur :

Tabel 17. Target Perpindahan (FEMA-440) Arah X

Model	Target Perpindahan Arah X	
	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (kN)
TDL	258.007	21,389.280
DDL (a)	256.251	10,245.556
DDL (b)	268.077	10,746.540
TDT	263.022	21,116.448
DDT (a)	242.290	6,525.317
DDT (b)	252.113	14,371.728

Sumber : Hasil Analisis

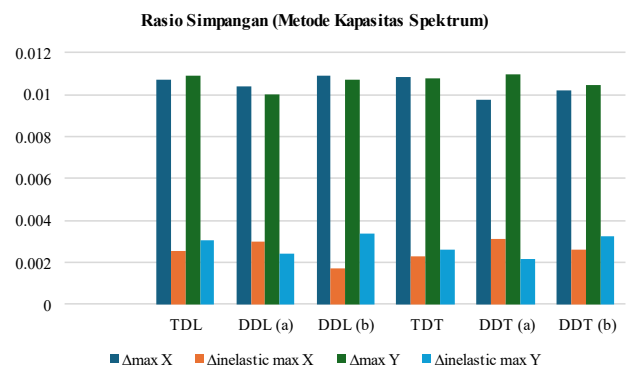
Tabel 18. Target Perpindahan (FEMA-440) Arah Y

Model	Target Perpindahan Arah Y	
	Perpindahan (mm)	Gaya Geser (kN)
TDL	263,291	20.283,829
DDL (a)	247,742	10.779,932
DDL (b)	262,203	10.415,919
TDT	260,682	20.914,410
DDT (a)	272,459	6.455,603
DDT (b)	257,305	13.879,357

Sumber : Hasil Analisis

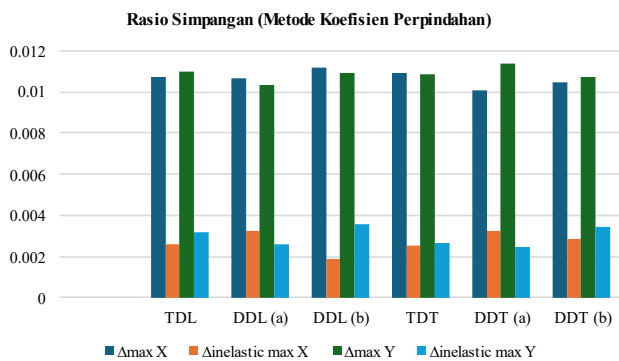
Rasio Simpangan Struktur

Setelah menentukan titik kinerja dan target perpindahan selanjutnya dilakukan analisis terkait rasio simpangan pada struktur. Analisis rasio simpangan ditinjau pada dua kondisi yaitu simpangan maksimum dan simpangan inelastik maksimum. Simpangan total maksimum dihitung sebagai perbandingan antara perpindahan saat *performance point* atau target perpindahan terhadap tinggi total bangunan. Sementara itu, simpangan inelastik maksimum dihitung sebagai selisih antara perpindahan saat *performance point* dan target perpindahan dengan perpindahan pada saat leleh pertama, kemudian dibagi dengan tinggi total bangunan [13]. Selanjutnya akan disajikan grafik rekapitulasi simpangan struktur pada masing-masing model struktur berdasarkan analisis *pushover* metode kapasitas spektrum (ATC-40) dan koefisien perpindahan (FEMA-440) :



Gambar 16. Grafik Rekapitulasi Simpangan Berdasarkan Titik Kinerja (ATC-40)

Sumber : Hasil Analisis



Gambar 17. Grafik Rekapitulasi Simpangan Berdasarkan Target Perpindahan (FEMA-440)
Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan Gambar 16 (titik kinerja), pada konfigurasi L, simpangan maksimum total arah X menurun pada DDL (a) sebesar 2,80% namun meningkat pada DDL (b) sebesar 1,87%, sedangkan arah Y menurun pada kedua model (8,26% dan 1,83%) dibandingkan TDL. Ditinjau dari simpangan inelastis maksimum, arah X meningkat pada DDL (a) sebesar 20,00% dan menurun pada DDL (b) sebesar 32,00%, sedangkan arah Y menurun pada DDL (a) sebesar 22,58% dan meningkat pada DDL (b) sebesar 9,68%. Pada konfigurasi T, simpangan maksimum total arah X menurun pada kedua model (11,01% dan 6,42%), sedangkan arah Y meningkat pada DDT (a) sebesar 1,85% dan menurun pada DDT (b) sebesar 2,78% dibandingkan TDT. Simpangan inelastis maksimum arah X meningkat pada kedua model (34,78% dan 13,04%), sedangkan arah Y menurun pada DDT (a) sebesar 15,38% dan meningkat pada DDT (b) sebesar 23,08%.

Berdasarkan Gambar 17 (target perpindahan), pada konfigurasi L, simpangan maksimum total arah X menurun pada DDL (a) sebesar 0,93% namun meningkat pada DDL (b) sebesar 3,70%, sedangkan arah Y menurun pada kedua model (6,36% dan 0,91%) dibandingkan TDL. Simpangan inelastis maksimum arah X meningkat pada DDL (a) sebesar 23,08% dan menurun pada DDL (b) sebesar 26,92%, sedangkan arah Y menurun pada DDL (a) sebesar 18,75% dan meningkat pada DDL (b) sebesar 12,50%. Pada konfigurasi T, simpangan maksimum total arah X menurun pada kedua model (8,18% dan 4,55%), sedangkan arah Y meningkat pada DDT (a) sebesar 4,59% dan menurun pada DDT (b) sebesar 1,83% dibandingkan TDT. Simpangan inelastis maksimum arah X meningkat pada kedua model (28,00% dan 12,00%), sedangkan arah Y menurun pada DDT (a) sebesar 11,11% dan meningkat pada DDT (b) sebesar 25,93%.

Tingkat Kinerja Struktur

Evaluasi tingkat kinerja struktur dilakukan berdasarkan nilai rasio simpangan maksimum dan rasio simpangan

inelastis maksimum yang diperoleh dari analisis *pushover*. Penilaian kinerja struktur menurut ATC-40 menggunakan hasil analisis metode kapasitas spektrum (titik kinerja), sedangkan menurut FEMA-440 menggunakan hasil analisis metode koefisien perpindahan (target perpindahan). Selanjutnya, disajikan tabel rekapitulasi tingkat kinerja struktur untuk masing-masing model struktur sebagai berikut :

Tabel 19. Rekapitulasi Tingkat Kinerja Struktur Berdasarkan Rasio Simpangan Maksimum

Model	Tingkat Kinerja Struktur			
	ATC-40		FEMA-440	
	X	Y	X	Y
TDL	DC	DC	LS	LS
DDL (a)	DC	IO	LS	LS
DDL (b)	DC	DC	LS	LS
TDT	DC	DC	LS	LS
DDT (a)	IO	DC	LS	LS
DDT (b)	DC	DC	LS	LS

Sumber : Hasil Analisis

Tabel 20. Rekapitulasi Tingkat Kinerja Struktur Berdasarkan Rasio Simpangan Inelastik

Model	Tingkat Kinerja Struktur			
	ATC-40		FEMA-440	
	X	Y	X	Y
TDL	IO	IO	LS	LS
DDL (a)	IO	IO	LS	LS
DDL (b)	IO	IO	IO	LS
TDT	IO	IO	LS	LS
DDT (a)	IO	IO	LS	IO
DDT (b)	IO	IO	LS	LS

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan titik kinerja ATC-40, penerapan dilatasi meningkatkan kinerja struktur pada kedua konfigurasi. Pada bentuk L, tingkat kinerja meningkat dari DC (model TDL) menjadi IO (model DDL (a) arah Y), sedangkan pada bentuk T meningkat dari DC (model TDT) menjadi IO (model DDT (a) arah X), dengan seluruh model pada kedua konfigurasi mencapai IO berdasarkan simpangan inelastis maksimum. Sementara itu, berdasarkan target perpindahan FEMA-440, sebagian besar model pada kedua konfigurasi berada pada tingkat LS, kecuali model DDL (b) arah X pada bentuk L dan model DDT (a) arah Y pada bentuk T yang meningkat menjadi IO. Secara keseluruhan, penerapan dilatasi memengaruhi karakteristik deformasi struktur akibat perubahan kekakuan, massa, dan gaya geser dasar, sehingga menghasilkan respons simpangan yang bervariasi pada setiap blok dan arah pembebanan. Variasi tersebut meningkatkan tingkat kinerja struktur pada arah tertentu, dari DC atau LS menjadi IO, dengan seluruh model tetap memenuhi batas kinerja hingga LS.

Jarak Dilatasi

Jarak pemisah antar struktur atau dilatasi berperan penting karena menentukan besar kecilnya risiko tumbukan

(*pounding*) saat terjadi gempa [15]. Jarak minimum dilatasi dapat ditentukan berdasarkan kombinasi perpindahan masing-masing struktur pada kondisi titik kinerja (ATC-40) dan target perpindahan (FEMA-440) menggunakan metode *square root of the sum of the squares* (SRSS). Selanjutnya akan disajikan contoh perhitungan jarak dilatasi pada salah satu konfigurasi bentuk L yang mengacu pada hasil analisis titik kinerja :

δ_{MA} = Perpindahan blok dilatasi A
= 250,134 mm

δ_{MB} = Perpindahan blok dilatasi B
= 262,373 mm

δ_T = Jarak minimum dilatasi
= $\sqrt{(\delta_{MA})^2 + (\delta_{MB})^2}$
= $\sqrt{(250,134)^2 + (262,373)^2}$
= 362,50 mm $\approx$ 365,00 mm

Tabel 21. Rekapitulasi Jarak Dilatasi

Parameter	Sat	Titik Kinerja		Target Perpindahan	
		L	T	L	T
δ_{MA}	mm	250,134	263,521	256,251	272,459
δ_{MB}	mm	262,373	251,687	268,077	257,305
δ_T	mm	362,500	364,403	370,850	374,753
δ_T Pakai	mm	365,000	365,000	375,000	375,000

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan Tabel 21, pada kedua konfigurasi bentuk L dan T, jarak dilatasi berdasarkan titik kinerja ditetapkan sebesar 365 mm, sedangkan berdasarkan target perpindahan sebesar 375 mm. Target perpindahan menghasilkan kebutuhan jarak yang lebih besar, sehingga jarak dilatasi 375 mm digunakan pada kedua konfigurasi bentuk yang ditinjau untuk mengakomodasi pergerakan relatif antarblok struktur dan meminimalkan potensi tumbukan (*pounding*).

Rencana Anggaran Biaya

Pengaruh penerapan dilatasi juga ditinjau dari aspek perbandingan rencana anggaran biaya (RAB) pekerjaan struktur pada setiap model bangunan. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan total biaya pekerjaan struktur antara model tanpa dilatasi dan model dengan dilatasi. Pekerjaan yang ditinjau meliputi pekerjaan pembesian, bekisting, dan beton. Berikut akan disajikan rekapitulasi total biaya pekerjaan struktur pada masing-masing model :

Tabel 22. Rekapitulasi Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Model	Rencana Anggaran Biaya (RAB)	
	Biaya Pekerjaan (Rp)	Total (Rp)
TDL	Rp16.820.245.653	Rp16.820.245.653
DDL (a)	Rp7.915.652.741	Rp16.269.465.467
DDL (b)	Rp8.353.812.726	
TDT	Rp16.809.160.752	Rp16.809.160.752
DDT (a)	Rp5.256.654.672	Rp16.422.305.094

DDT (b) Rp11.165.650.421

Sumber : Hasil Analisis

Berdasarkan hasil analisis Rencana Anggaran Biaya (RAB), pada konfigurasi bentuk L, total RAB model DDL sebesar Rp16.269.465.467, mengalami penurunan sebesar Rp550.780.185 atau 3,27% dibandingkan model TDL sebesar Rp16.820.245.653. Pada konfigurasi bentuk T, total RAB model DDT sebesar Rp16.422.305.094, mengalami penurunan sebesar Rp386.855.658 atau 2,30% dibandingkan model TDT sebesar Rp16.809.160.752. Penurunan biaya tersebut dipengaruhi oleh berkurangnya kuantitas pembesian setelah penerapan dilatasi, meskipun kuantitas pekerjaan beton dan bekisting mengalami peningkatan. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan dilatasi berpengaruh terhadap penurunan total RAB pekerjaan struktur pada model yang ditinjau dibandingkan dengan kondisi tanpa dilatasi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, berikut ini adalah beberapa poin simpulan yang menjadi inti dari hasil penelitian :

1. Berdasarkan hasil desain penulangan elemen struktur Penerapan dilatasi tidak memengaruhi kebutuhan penulangan pelat lantai, namun menurunkan kebutuhan penulangan balok sebesar 7,14% (L) dan 3,97% (T), serta penulangan kolom sebesar 5,09% pada kedua konfigurasi, akibat berkurangnya gaya dalam pada balok dan kolom setelah struktur dipisah menjadi blok-blok independen.
2. Berdasarkan analisis kurva kapasitas, penerapan dilatasi menurunkan gaya geser dasar maksimum sebesar 38,28–59,44% pada konfigurasi L dan 20,34–69,64% pada konfigurasi T dibandingkan model tanpa dilatasi, akibat terpisahnya struktur menjadi blok-blok yang bekerja secara independen. Perpindahan maksimum menunjukkan respons yang bervariasi pada setiap blok dan arah pembebanan, karena distribusi massa dan kekakuan tiap blok berbeda dari kondisi struktur utuh, sehingga menghasilkan karakteristik respons lateral yang berbeda dibandingkan struktur tanpa dilatasi pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal yang ditinjau.
3. Berdasarkan analisis titik kinerja metode kapasitas spektrum ATC-40 pada kedua konfigurasi, model dilatasi menunjukkan peningkatan tingkat kinerja dari Damage Control menjadi Immediate Occupancy ditinjau dari simpangan maksimum. Sementara itu, berdasarkan analisis target perpindahan metode koefisien perpindahan FEMA-440, model dilatasi menunjukkan peningkatan tingkat kinerja dari Life Safety menjadi

Immediate Occupancy ditinjau dari simpangan inelastik maksimum. Berdasarkan kedua metode tersebut, diperoleh jarak dilatasi yang dibutuhkan sebesar 375 mm. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan dilatasi mampu meningkatkan kinerja struktur pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal yang ditinjau.

4. Berdasarkan analisis biaya pekerjaan struktur, penerapan dilatasi menurunkan total biaya pekerjaan struktur sebesar 3,27% pada konfigurasi bentuk L dan 2,30% pada konfigurasi bentuk T dibandingkan model tanpa dilatasi. Penurunan tersebut dipengaruhi oleh berkurangnya kuantitas pembesian, meskipun kuantitas pekerjaan beton dan bekisting mengalami peningkatan. Dengan demikian, penerapan dilatasi berpengaruh terhadap penurunan total biaya pekerjaan struktur pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal yang ditinjau.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BMKG, "Pengetahuan Tentang Gempa Bumi," Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah II. Accessed: Dec. 22, 2025. [Online]. Available: <https://bbmkg3.bmkg.go.id/tentang-gempa>
- [2] S. J. Hutchings and W. D. Mooney, "The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 22, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.1029/2021GC009812.
- [3] N. W. M. T. Lamia, R. Pandaleke, and D. Handono, "Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang dengan Denah Bangunan Berbentuk 'L,'" *Jurnal Sipil Statik*, vol. 8, no. 4, pp. 519–532, 2020.
- [4] M. Al Siddique and M. Hasan, "Effect of Plan Irregularity on Seismic Performance of the Building," *Journal of Construction and Building Materials Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 37–45, 2021, [Online]. Available: www.matjournals.com
- [5] Amalia, R. Fadlli, and L. Tiyani, "Respon Struktur Akibat Penempatan Dilatasi pada Bangunan dengan Ketidakberaturan Horizontal," *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Terapan*, vol. 9(1), pp. 74–81, Dec. 2022.
- [6] K. Kuria and O. Kegyeg-Brassai, "Pushover Analysis in Seismic Engineering: A Detailed Chronology and Review of Techniques for Structural Assessment," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 151, pp. 1–35, Dec. 2024, doi: 10.3390/app14010151.
- [7] R. Prihandoyo, Bayzoni, H. Husni, and F. Alami, "Evaluasi Pengaruh Dilatasi pada Gedung Baja Empat Lantai Terhadap Beban Gempa menggunakan Metode Statik Pushover," *JRSDD*, vol. 9, no. 4, pp. 749–762, Dec. 2021.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, SNI 2847-2019. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2019.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*, SNI 1726:2019. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2019.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung*, SNI 1727:2020. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2019.
- [11] R. Resatoglu and S. Jkhsi, "Evaluation of Ductility of Reinforced Concrete Structures With Shear Walls Having Different Thickness and Differents Poistions," *IJUM Engineering Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 32–44, Jul. 2022, doi: 10.31436/ijumej.v23i2.2070.
- [12] I. Nasution, Erizal, and M. Fauzan, "Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat di Jakarta Menggunakan Pushover Analysis," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 9, no. 2, pp. 199–210, Oct. 2024, doi: 10.29244/jsil.9.2.199-210.
- [13] Applied Technology Council, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40. Redwood City: Applied Technology Council, 1996. [Online]. Available: www.4downloader.ir
- [14] Federal Emergency Management Agency, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, FEMA-440. Redwood City: Applied Technology Council, 2005.
- [15] M. Miari and R. Jankowski, "Effective Equations for the Optimum Seismic Gap Preventing Earthquake-Induced Pounding between Adjacent Buildings Founded on Different Soil Types," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 17, Sep. 2023, doi: 10.3390/app13179741.