

Value engineering review perencanaan struktur bangunan gedung pendidikan dasar dan menengah dengan *pushover* analysis-FEMA 440 EL

Denny^{1,*}, Dwi Dinariana², Hari Nugraha Nurjaman³

¹Program Magsiter Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Persada Indonesia-YAI, Jakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Value engineering
Pushover analysis FEMA 440el
Structural design
educational buildings

Corresponding Author:

Denny
denny.and.partners@gmail.com

Abstract

"Indonesia, located in a seismically active region, has numerous multi-story buildings that are crucial for supporting economic and educational activities. This research aims to perform value engineering on the existing structural design of buildings to be more earthquake-resistant and cost-efficient. The focus of the study is on identifying the structural elements that consume the largest budget and evaluating the seismic performance of the structure using different design methods. The results of the study indicate that floor slabs, beams, and columns are the dominant structural elements in the budget. Pushover analysis using the FEMA 440EL procedure on the existing design shows the potential for soft-story vulnerability and post-elastic collapse without achieving a performance point. Redesign using the force-based seismic design method (SNI 1726:2019) increases the cost of beams by 24.74% and the cost of columns by 3.47%, while the design approach with pushover analysis using the FEMA 440EL procedure significantly reduces the cost of beams and columns, while still meeting the desired performance target (Immediate Occupancy). This research concludes that the application of design with the pushover analysis approach using the FEMA 440EL procedure can be an effective solution for designing earthquake-resistant buildings with more efficient costs, reducing the cost of beams by 30.98% and columns by 27.86%."

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang terletak di wilayah cincin api Pasifik, yang menjadikannya rawan terhadap bencana gempa bumi. Bangunan bertingkat 1 (satu) sampai bertingkat 8 (delapan) merupakan bangunan yang mendominasi bangunan-bangunan yang berada di kota-kota besar di Indonesia, khususnya kota Jakarta. Menurut PP Nomor 16 Tahun 2021 Tentang Peraturan Pelaksanaan UU Nomor 28 Tahun 2002 Tentang Bangunan Gedung mengklasifikasikan bahwa bangunan bertingkat Rendah adalah bangunan gedung dengan jumlah lantai sampai dengan 4 (empat) dan bangunan bertingkat Sedang adalah

bangunan gedung dengan jumlah lantai bangunan 5 (lima) sampai 8 (delapan) lantai. Oleh karena itu, perencanaan struktur bangunan yang tahan terhadap gempa sangat penting untuk menjamin keselamatan dan kenyamanan penghuninya dalam menjalankan setiap aktifitas termasuk aktifitas perekonomian dan pendidikan. Sebagai Salah satu penunjang kegiatan perekonomian dan pendidikan, sektor konstruksi memegang peranan penting mempercepat pertumbuhan perekonomian dan sarana pendidikan .

Sektor konstruksi, khususnya konstruksi bangunan gedung dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin dan seefektif mungkin jika pemilihan jenis struktur bangunan dalam pelaksanaan konstruksinya menggunakan

biaya (*cost*) seoptimal mungkin. Suatu bangunan tidak saja perlu memenuhi persyaratan teknis (*technically possible*), tetapi juga memenuhi kelayakan secara ekonomi (*economically feasible*) (Juwana, 2005: 268)..

Melalui tangan kreatif para *engineer*, suatu perusahaan konsruksi atau investasi dapat melihat potensi penghematan pada proyek yang dihadapi. Meskipun tingkat keberhasilan dan nilai penghematan berbeda, namun dapat dipastikan bahwa setiap proyek berpotensi dapat dilakukan penghematan terhadap design yang ada dan atau penghematan terhadap metode konstruksi (Sucipto, 2008:1). Salah satu teknik manajemen dalam perencanaan yang berkembang pesat adalah *value engineering* (rekayasa nilai) yang merupakan pendekatan sistematis serta usaha terarah untuk analisis fungsi dan biaya terhadap suatu pekerjaan proyek agar memperoleh biaya yang optimal, dengan batasan fungsional dan mutu pekerjaan (Firda & Saputra, 2018) Dengan memanfaatkan *value engineering* dapat dilakukan penghematan dari seluruh total biaya proyek (Pramesti dkk. 2022).

Dalam beberapa tahun terakhir, Konsep terbaru dalam perencanaan dan evaluasi bangunan terhadap gempa adalah *Performance Based Earthquake Engineering (PBEE)* (Indah dkk. 2020). pendekatan *Performance Based Earthquake Engineering* atau biasa disebut *Performance-Based Seismic Design (PBSD)* Hal ini mempertimbangkan *performance* struktur berupa analisis level keruntuhan atau level kinerja yang dicapai struktur pada saat terjadi beban gempa (Retno dkk. 2022). Penerapan *PBSD* dalam perencanaan struktur gedung Pendidikan dasar dan menengah dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan struktur terhadap beban gempa. Salah satu pendekatan yang digunakan untuk memodelkan kinerja seismik struktur adalah analisis Statik *Non-Linear Pushover Analysis Prosedur FEMA 440EL*, yang memungkinkan perhitungan kapasitas struktur secara lebih rinci, terutama dalam hal bagaimana struktur

berperilaku saat mengalami pembebanan seismik secara lebih ekstrem pasca-elastis. Kinerja struktur berdasarkan *FEMA 273* yang terkait level kinerja *Oprasional level, immediate occupancy, life safety elevl, collaps prevention* dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tingkat Kinerja Struktur Berdasarkan *FEMA 273/356*

No.	Tingkat Kinerja	Uraian
1.	<i>Operational Level</i> (Tingkat Operasional)	Peralatan utilitas masih berfungsi; terdapat sedikit kerusakan
2.	<i>Immadiate Occupancy Level</i> (Tingkat Penggunaan Sedang)	Bangunan aman untuk digunakan dari hasil pemeriksaan; perlu sedikit perbaikan
3.	<i>Life Safety Level</i> (Tingkat Aman untuk Dihuni)	Struktur tetap stabil dan mempunyai kapasitas pelayanan cukup; kerusakan bagian nonstruktural masih terkontrol
4.	<i>Collapse Prevention</i> (Tingkat Pencegahan Keruntuhan)	Bangunan tetap berdiri, hamper runtuh; kerusakan atau kehilangan lain masih diperkenankan

Sumber : *FEMA 273/356*

Kinerja struktur berdasarkan *ATC-40* yang membatasi nilai maksimum simpangan antar lantai (*interstorey drift limit*) untuk menjelaskan hubungan masing-masing level kinerja, baik itu *Immadiate Occupancy, damage control, life safety dan structural stability* disampaikan pada Tabel 2.

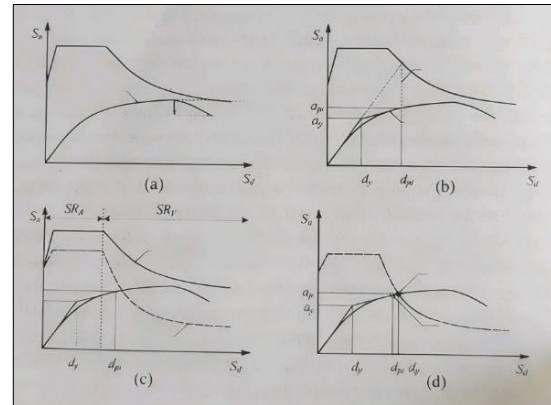
Tabel 2. Batas *drift rasio* pada level kinerja berdasarkan *ATC-40*

Performance Level				
Interstorey Drift Limit (Batas Simpangan Antar Lantai)	Immadiate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Maximum Total Drift (Simpangan Total Maksimum)	0.01	0.01-0.02	0.02	$0.33 \frac{V}{P_i}$
Maximum Inelastic Drift (Simpangan Inelastis Maksimum)	0.005	0.005-0.015	No Limit	No Limit

Sumber : *ATC-40*

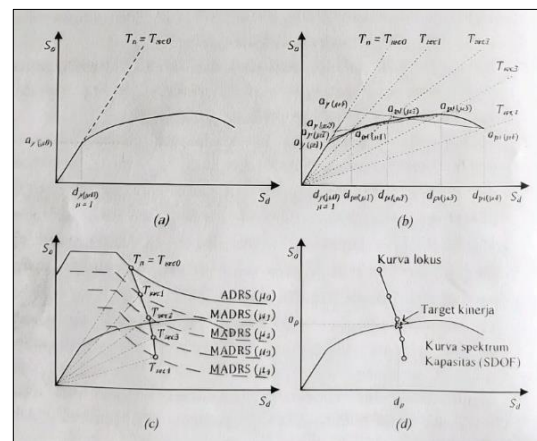
Pendekatan desain struktur dalam *review* desain *DED* Eksisting dengan menggunakan pendekatan *Performance Based Seismic Design* (Desain Seismik Berbasis Kinerja) dengan metode analisis Statik *Non-Linear Pushover Analysis (Capacity Spectrum Method FEMA 440-EL)* dilakukan dengan diberikan perpindahan lateral sampai dengan batas tertentu dengan *increment* tertentu untuk memperlihatkan perilaku keruntuhan dari sistem struktur. Dari hasil *pushover Analysis* bisa diperoleh grafik-grafik *Capacity Curve*, *Spectra Demand* dan *Elastic Response Spectra (ADRS)* dalam *ATC-40* (1996) dan kurva *ADRS* direduksi menjadi kurva *Modified Acceleration-Displacement Response Spectra (MADRS)* (ulza, Adrian, 2021:178) dalam *FEMA-EL* (Prosedur C *FEMA 440 EL* tahun 2005 untuk mengetahui *performance point* dari sistem struktur tersebut. Berikut Gambaran umum skematik perbedaan Prosedur Kurva *ADRS* dalam *ATC-40* (1996) *Capacity Spectrum Method (CSM)* dan Kurva *MADRS* dalam *FEMA 440-EL*

Capasity Spectrum Method (CSM) yang telah dipebarui menjadi *Equivalent Linearization Procedure (ELP)*. Penjelasan kurva Prosedur *CSM* dalam *ATC-40* 1996 dijelaskan Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan prosedur *CSM* dalam *ATC-40* 1996

Penjelasan Kurva prosedur *FEMA 440EL* 2005 yang reduksi dari kurva *ADRS* menjadi kurva *MADRS* dalam dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan prosedur *ELP* dalam *FEMA 440EL* 2005

Tujuan penelitian

Berdasarkan latar belakang penelitian, permasalahan yang dikaji dalam studi ini meliputi Mengetahui jenis elemen pekerjaan struktur yang paling banyak mengeluarkan anggaran biaya proyek. Mengetahui kinerja seismik struktur *DED Eksisting*, *Review DED*

Struktur menggunakan standar Gempa SNI 1726:2019 (*Force-Based Seismic Design*) dan *Review DED struktur* pendekatan performance-based seismic design (Analisis Pushover-FEMA 440EL). Mengetahui besar biaya *DED Struktur Eksisting*, *Biaya Review DED Struktur* menggunakan standar Gempa SNI 1726:2019 (*Force-Based Seismic Design*) dan biaya *Review DED struktur* menggunakan pendekatan performance-based seismic design (Analisis Pushover-FEMA 440EL).

Lingkup penelitian

Lingkup penelitian ini mencakup pemodelan ulang struktur eksisting dalam bentuk model tiga dimensi (3D) untuk melakukan analisis modal, sehingga diperoleh karakteristik dinamik struktur berupa *mode shape* dengan rasio partisipasi massa kumulatif minimal 90% sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Ragam getaran fundamental struktur dipastikan bertranslasi dominan pada arah-x dan arah-y untuk menentukan periode getar alami fundamental struktur. Analisis struktur terhadap beban gempa dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu analisis linier berbasis desain kapasitas/Force Based Design Earthquake (Elastik) dan analisis nonlinier berbasis *Performance-Based Seismic Design* melalui *Pushover Analysis* dengan *Capacity Spectrum Method* FEMA 440-EL. Analisis komparatif struktur dilakukan untuk wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi, dengan lokasi studi di Provinsi DKI Jakarta, guna mengevaluasi efektivitas penerapan *Value Engineering* dalam meningkatkan efisiensi jumlah tulangan pada review perencanaan struktur dengan tetap memenuhi kriteria kinerja seismik yang disyaratkan.

Metodologi Penelitian

Analisa *Value Engineering (VE)* dilakukan delapan tahap, yaitu tahap informasi, tahap analisis fungsi, tahap kreatif, tahap evaluasi ide, tahap pengembangan ide, tahap evaluasi alternatif, tahap penyusunan rekomendasi dan tahap presentasi. Adapun tahap-tahapan tersebut adalah sebagai berikut :

a. Tahap Informasi

Pada tahap informasi ini dilakukan upaya-upaya untuk mendapatkan informasi sebanyak-banyaknya yang relevan.

b. Tahap Analisis Fungsi

Tahap analisa fungsi adalah salah satu tahap dari rencana kerja/job plan rekayasa nilai yang bertujuan untuk memahami proyek dari sudut pandang fungsi berdasarkan apa yang harus dilakukan. Tahapan awal analisis ini dilakukan dengan *Functional Analysis System Technique (FAST) Diagram*.

c. Tahap Kreatif

Didalam *Value Engineering*, berfikir kreatif adalah hal yang sangat penting dalam mengembangkan ide-ide untuk memunculkan alternatif-laternatif dari elemen yang masih memenuhi fungsi tersebut, kemudian disusun secara sistematis.

d. Tahap Evaluasi Ide

Tujuan dari tahap evaluasi ide adalah untuk mengevaluasi ide-ide yang berpotensi memberikan nilai tambah.

e. Tahap Pengembangan Ide

Tahap pengembangan ide bertujuan untuk mengembangkan ide-ide yang sudah dievaluasi dari tahap evaluasi ide menjadi alternatif.

f. Tahap Evaluasi Alternatif

Tahap evaluasi alternatif bertujuan untuk mencari nilai tambah dari alternatif-alternatif yang dihasilkan dari tahap pengembangan ide.

g. Tahap Penyusunan Rekomendasi

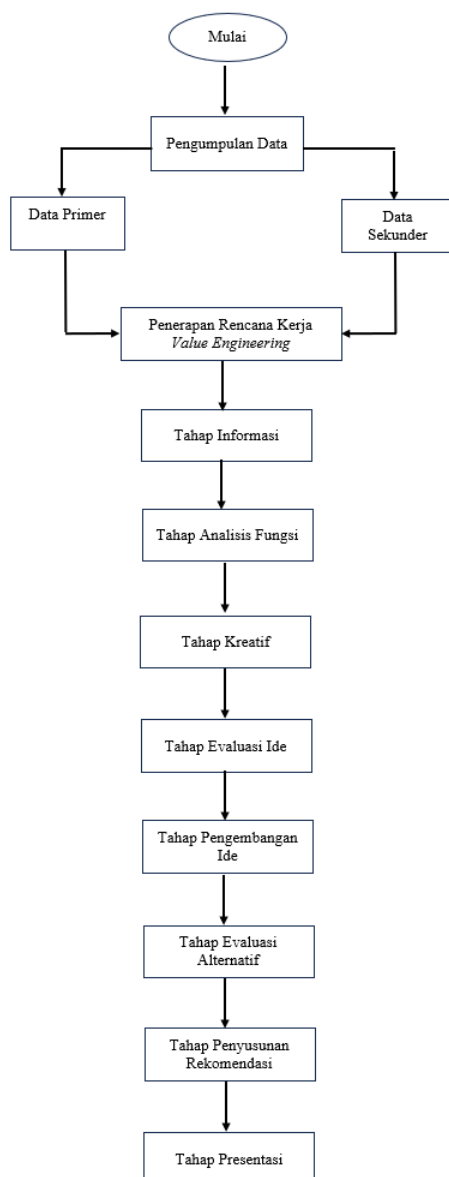
Tahap penyusunan rekomendasi bertujuan untuk menyusun rekomendasi-rekomendasi yang akan diambil. Dengan menerapkan prinsip ini, dapat menghasilkan solusi rekomendasi yang terbaik dalam proses keluaran VE

h. Tahap Presentasi

Tahap ini adalah tahap terakhir dalam rencana kerja VE dengan mengumpulkan seluruh hasil dari tahap informasi, tahap analisis fungsi, tahap kreatif, tahap evaluasi ide, tahap pengembangan ide, tahap evaluasi alternatif, dan tahap

penyusunan rekomendasi. Pada tahap presentasi ini penulis mencoba untuk menyampaikan bahwa dengan pendekatan analisis struktur statik non-linear *pushover* akan didapat bahwa elemen-elemen struktur utama masih memungkinkan untuk dilakukan penghematan jumlah tulangan di daerah rawan gempa seperti Provinsi DKI Jakarta.

Langkah-langkah penelitian yang dilaksanakan dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Hasil Dan Pembahasan Penelitian

Tahap informasi

Gedung yang dianalisis adalah bangunan gedung 6 lantai dengan data sebagai berikut :

- Nama Bangunan : Bangunan Sekolah Dasar dan Menengah
- Lokasi: Jakarta Pusat
- Fungsi Bangunan : Fasilitas Pendidikan
- Panjang Bangunan : 20,625 m
- Lebar Bangunan : 10,4 m
- Jumlah Tingkat : 6 Lantai
- Tinggi per Lantai : 3,45m
- Tinggi Total Bangunan : 20,7 m

Data Material Beton :

- Kuat Tekan Beton (f_c') = 24,90 MPa
- Berat Jenis = 2400 kg/m³
- Mod. Elastisitas Beton = 23500 Mpa

Data Material Baja Tulangan :

- BJTS 420 f_y = 420 Mpa
- Berat Jenis = 7850 kg/m³
- Mod. Elastisitas Baja = 200000 Mpa
- Kuat Leleh (f_y) = 420 Mpa
- Kuat Tarik (f_u) = 525 Mpa

Dimensi Elemen Struktur :

Tabel 3. Dimensi Elemen Struktur

No.	Elemen Struktur	Keterangan
1	Kolom	K1 500x600, K1a. 600x700, K1a. 700x800,
2	Balok	B1 300x600, B2 250x450, B3 350x650,
3	Plat Lantai	$t = 130$ mm,
4	Plat Tangga	$t = 150$ mm,

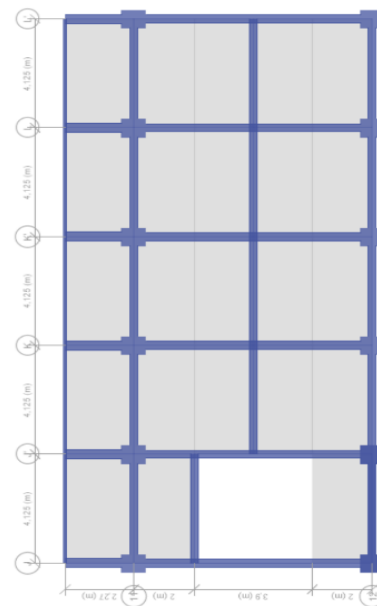
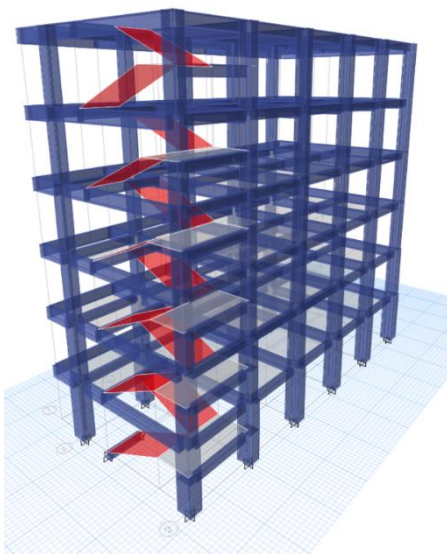
Sumber : data DED eksisting

Tabel 4. Biaya total pekerjaan

	Item Pekerjaan	Biaya	Presentase	Presentase Kumulatif
A	PEKERJAAN STRUKTUR	Rp 27.330.047.941	43,45%	43,45%
B	PEKERJAAN ARSITEKTUR	Rp 21.411.828.035	34,04%	77,49%
C	PEKERJAAN MEP	Rp 10.896.726.924	17,32%	94,82%
D	PEKERJAAN SITE DEVELOPMI	Rp 2.422.904.072	3,85%	98,67%
E	PEKERJAAN PERSIAPAN	Rp 835.638.254	1,33%	100,00%
	Biaya Total Konstruksi	Rp 62.897.145.227	100,00%	

Sumber : data DED eksisting

Model Struktur Bangunan :



Gambar 4. Gambar 3D struktur

Gambar 5. Gambar Denah struktur

Tabel 4. Cost Model pekerjaan struktur

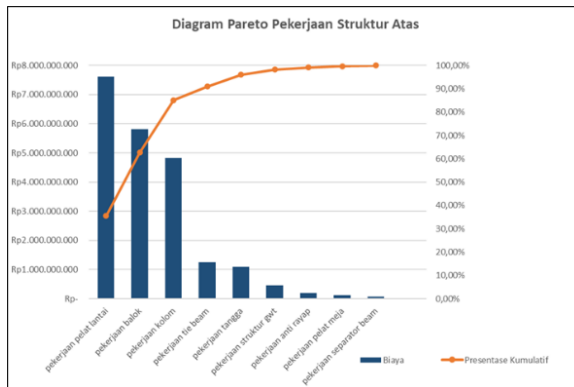
No	Daftar Pekerjaan Struktur	Biaya	Kumulatif Biaya	Presentase	Presentase Kumulatif
1	Pekerjaan Struktur Bawah	Rp 5.889.689.385	Rp 5.889.689.385	21,55%	21,55%
2	Pekerjaan Struktur Atas	Rp 21.440.358.556	Rp 27.330.047.941	78,45%	100,00%
	Jumlah	Rp 27.330.047.941		100,00%	

Sumber : data DED eksisting

Tabel 5. Cost Model pekerjaan struktur Atas

No	Daftar Pekerjaan Struktur Atas	Biaya	Kumulatif Biaya	Presentase	Presentase Kumulatif
1	pekerjaan pelat lantai	Rp 7.615.655.082	Rp 7.615.655.082	35,52%	35,52%
2	pekerjaan balok	Rp 5.809.404.269	Rp 13.425.059.351	27,10%	62,62%
3	pekerjaan kolom	Rp 4.815.963.393	Rp 18.241.022.744	22,46%	85,08%
4	pekerjaan tie beam	Rp 1.254.408.109	Rp 19.495.430.854	5,85%	90,93%
5	pekerjaan tangga	Rp 1.097.211.691	Rp 20.592.642.544	5,12%	96,05%
6	pekerjaan struktur gwt	Rp 454.212.911	Rp 21.046.855.455	2,12%	98,16%
7	pekerjaan anti rayap	Rp 187.153.878	Rp 21.234.009.333	0,87%	99,04%
8	pekerjaan pelat meja	Rp 131.357.846	Rp 21.365.367.179	0,61%	99,65%
9	pekerjaan separator beam	Rp 74.991.377	Rp 21.440.358.556	0,35%	100,00%
	Jumlah	Rp 21.440.358.556		100,00%	

Sumber : data DED eksisting



Gambar 6. Diagram pareto pekerjaan struktur atas

Dari hasil pareto keseluruhan biaya dapat dilihat bahwa pada Pekerjaan struktur atas bobot paling besar Adalah berturut turut Pekerjaan struktur plat lantai, Pekerjaan struktur balok dan pekerjaaa struktur kolom dengan nilai Biaya 85,08% dari seluruh biaya Pekerjaan struktur atas, akan tetapi sesuai dengan Batasan fungsional, bahwa elemen-elemen struktur dengan fungsi dominan menerima gaya lateral gempa secara langsung dengan target berperilaku daktail dalam mendisipasi energi gempa Adalah Pekerjaan Balok dan Kolom (elemen struktur balok dan elemen struktur kolom) dengan nilai 49,56% dari seluruh biaya Pekerjaan struktur atas.

Tahap analisis fungsi

Analisis fungsi merupakan tahap fundamental dalam studi *Value Engineering* yang bertujuan untuk mengidentifikasi dan mendefinisikan fungsi utama (*basic function*) dan fungsi pendukung (*secondary function*) dari setiap elemen atau komponen pekerjaan yang

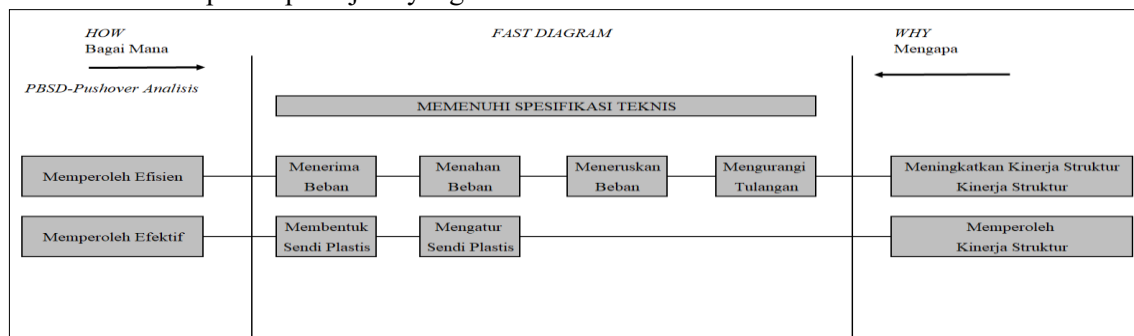
ditinjau secara sistematis, tanpa terlebih dahulu mempertimbangkan solusi teknis yang digunakan. Analisa fungsi merupakan basis utama di dalam *value engineering* karena analisis inilah yang membedakan *Value Engineering* dari teknik-teknik penghematan lainnya.

FAST (Function Analysis System Technique) adalah suatu metode untuk menganalisis, mengorganisir dan mencatat fungsi-fungsi dari suatu sistem secara terstruktur. Dengan menggunakan metode ini nantinya akan dapat dibangun suatu diagram yang menggambarkan fungsi-fungsi setiap elemen dalam suatu proyek secara sistematis dan dapat dicari hubungan antara masing-masing fungsi serta batasan lingkup permasalahan yang dikaji. Fungsi-fungsi dalam *FAST* diagram diidentifikasi dengan menggunakan kata kerja (*Verb*) dan kata benda (*Noun*).

Tabel 6. Analisis fungsi komponen

Kata Kerja	Kata Benda	Jenis Fungsi
Meningkatkan	Kinerja Struktur	Primer
Memperoleh	Kinerja Struktur	Primer
Memperoleh	Efisien	Primer
Memperoleh	Efektif	Primer
Menerima	Beban	Primer
Menahan	Beban	Primer
Meneruskan	Beban	Primer
Mengurangi	Tulangan	Primer
Membentuk	Sendi Plastis	Primer
Mengatur	Sendi Plastis	Primer

Sumber : Pengolahan data



Gambar 7. FAST Diagram

Tahap kreatif, tahap evaluasi ide dan tahap pengembangan ide

Merupakan tahap pengumpulan alternatif-alternatif sebagai *review* terhadap *DED* eksisting dengan menggunakan teknik *brainstorming* yang bertujuan untuk dapat efisiensi biaya pekerjaan struktur. Tahapan yang dilakukan adalah:

- a. Melakukan review *DED* struktur eksisting sesuai SNI 1727:2020, SNI 1726:2019, dan SNI 2847:2019 (Force-Based Seismic Design).
- b. Melakukan review *DED* struktur eksisting dengan analisis sesuai standar pada, SNI 2847:2019, SNI 1727:2020 dan Analisis Pushover prosedur FEMA 440EL, untuk memperoleh *performance point*.
- c. Menghitung biaya elemen balok dan kolom dari metode Force-Based dan Performance-Based Seismic Design (Analisis Pushover prosedur FEMA 440EL) untuk dibandingkan dengan biaya *DED* eksisting.

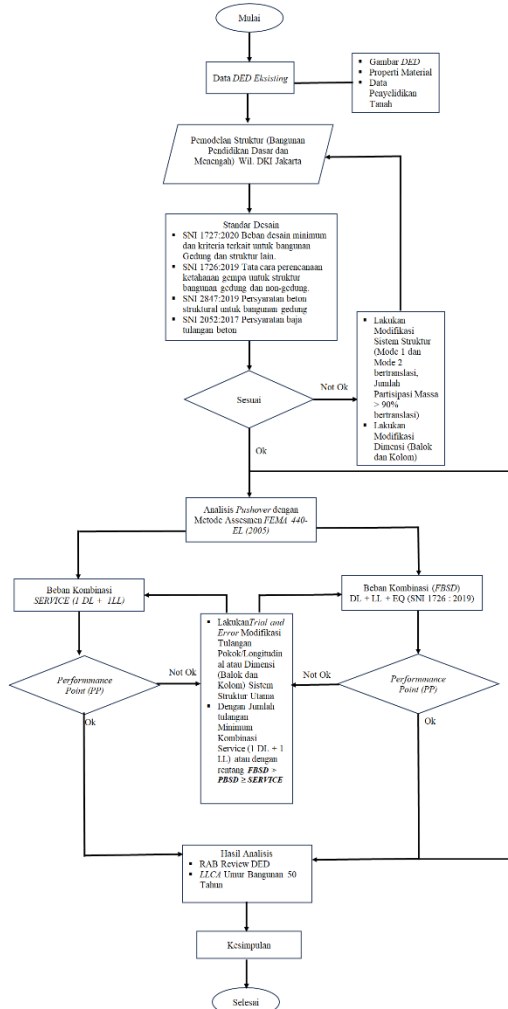
Tahap evaluasi ide merupakan tahap penting dalam metodologi *Value Engineering* yang bertujuan menilai dan menyaring alternatif-alternatif pada tahap kreatif untuk memperoleh penghematan/efisiensi paling signifikan. Pada studi *review* perencanaan struktur bangunan gedung pendidikan dasar dan menengah, evaluasi dan analisis difokuskan pada komponen dan item pekerjaan struktur yang memungkinkan untuk dapat penghematan/efisiensi biaya yang signifikan. Penilaian alternatif dilakukan sesuai dengan Analisis Pareto, yang digunakan untuk mengidentifikasi biaya komponen dan item Pekerjaan struktur yang memberikan pengaruh biaya yang cukup signifikan terhadap biaya total Pekerjaan struktur, hasil dari analisis pareto komponen dan item pekerjaan struktur yang sesuai dengan Tabel 5 dalam Tahap Evaluasi Ide ini dipilih komponen dan item pekerjaan balok dan kolom yang mempunyai bobot 49,558% terhadap biaya pekerjaan struktur atas dan 38,878% terhadap total biaya pekerjaan struktur yang dapat dikategorikan sebagai

komponen utama untuk dianalisis pada tahap selanjutnya.

Pada pengembangan ide, *DED* struktur eksisting dilakukan analisis dan perhitungan ulang dengan metode yang sama yaitu dengan SNI 1727:2020 tentang Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan Gedung dan struktur lain, SNI 1726:2019 tentang Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung. SNI 2847:2019 tentang Persyaratan beton struktural untuk bangunan Gedung SNI 2052:2017 tentang Persyaratan baja tulangan beton dan *FEMA 440 (Equivalent Linearization Method) 2005*. Adapun tahap pengembangan ide dapat dijelaskan pada bagan alir Gambar 8. Dari bagan alir tahap pengembangan ide diatas didapat hasil analisis dan perhitungan yang dibagi beberapa langkah berikut ini :

- a. Analisis ulang terhadap *DED Eksisting* sesuai dengan standar acuan SNI 1727:2020, SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Pada dimensi kolom dari lantai 1 s/d lantai 6 seragam dengan Uk. 500mm x 600mm, dimensi balok utama Uk. 300mm x 600mm untuk arah-Y dan dimensi balok Uk. 250mm x 450mm untuk arah-X. Dari hasil analisis struktur pada kolom-kolom lantai 1 terjadi O/S yang mana itu menunjukkan bahwa jumlah tulangan desain yang dibutuhkan cukup besar, sehingga penampang kolom Uk. 500mm x 600mm tidak mencukupi. Pada kolom, lantai 2 juga dapat dilihat bahwa rasio tulangan terhadap penampang lebih dari 3% yang menunjukkan bahwa tulangan cukup rapat, dapat dilihat dari hasil analisis bahwa gaya geser dari balok-balok utama Uk. 300mm x 600 gaya geser ultimit melebihi kapasitas geser nominal sehingga dalam analisis selanjutnya (*review DED eksisting*) dilakukan modifikasi dimensi untuk kolom lantai 1 dan kolom lantai 2 dan dimensi balok-balok utama dengan *trial and error* sampai sampai kapasitas nominal (M_n , V_n dan N_n) elemen balok dan kolom lebih besar dari beban ultimit baik terhadap kombinasi

beban gempa SNI 1726:2019 (*Force Based Design Earthquake*) ataupun kombinasi *Service Load (Comb. 1 DL + 1 LL)*



Gambar 8. Bagan alir tahap pengembangan ide

- b. *Review* terhadap *DED Eksisting* sesuai dengan standar acuan SNI 1727:2020, SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. *Review* dilakukan terhadap *DED Eksisting* mencakup memperbesar dimensi kolom lantai 1 dan lantai 2 yang gagal terhadap lentur dan pembesaran dimensi balok-balok utama yang gagal terhadap geser, baik balok arah-Y dan balok arah-X. Pembesaran dimensi kolom dan balok dilakukan dengan cara *trial and error* sampai didapat rasio tulangan kolom lantai 1 dan lantai 2 dengan rentang 1% s/d 2,5% dan dimensi balok utama sampai

terpenuhinya kapasitas geser nominal dan apabila diperlukan dapat juga meningkatkan mutu beton. Sehingga dapat dilihat bahwa pada kolom lantai 1 dan lantai 2 terjadi pembesaran, yang awalnya uk. 300mm x 600mm berturut-turut menjadi uk.700mm x 800mm (lantai 1) dan uk. 600mm x 700mm (lantai 2). Untuk dimensi balok yang awalnya uk. 300mm x 600mm menjadi uk. 350mm x 700mm dan balok uk. 250mm x 450mm menjadi uk. 250mm x 500mm.

- c. Analisis *pushover* dilakukan secara *trial and error* dengan rentang jumlah tulangan pokok/longitudinal $FBSD > PBS D \geq Comb. Service (1 DL + 1 LL)$ untuk mendapatkan *performance point (PP)* dan jumlah tulangan pokok/longitudinal yang optimal dengan target kinerja bangunan pendidikan dasar dan menengah dengan kategori resiko IV.

Dari hasil analisis *pushover* yang dilakukan *trial and error* untuk mendapatkan *performance point* dengan dimensi balok dan kolom sesuai dengan hasil analisis *review DED Force Based Seismic Design* (SNI 1726:2019), didapat bahwa Kinerja struktur berdasarkan *FEMA 440EL (2005)* dengan level kinerja sesuai berdasarkan *Performance Objectives Graph (FEMA 356 / ASCE41)* dan Batas *Drift Rasio* Pada Tingkat Kinerja Berdasarkan *ATC-40* didapat bahwa Tingkat kinerja struktur berada pada level *Immadiate Occupansy (IO)* dengan nilai *Base Shear FBSD* (SNI 1726:2019) Arah sumbu X dan Y sebesar 1103,10 kN dan *Base Shear Pushover* prosedur *FEMA 440EL* pada arah sumbu X *performance point* didapat sebesar 1512,424 kN, untuk arah sumbu Y *performance point* didapat sebesar 1188,098 kN. Perbandingan biaya analisis *DED eksisting* dan *review DED* dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8

Tahap evaluasi alternatif, tahap penyusunan rekomendasi dan presentasi

Tabel 7. Detail Biaya Elemen Struktur Balok Pada DED eksisting dan Review DED

NO.	URAIAN PEKERJAAN	DED Eksisting				NO.	URAIAN PEKERJAAN	Review DED (Force-Based Seismic Design)				NO.	URAIAN PEKERJAAN	Review DED (Performance-Based Seismic Design)			
		VOLUME	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Total Harga (Rp)			VOLUME	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Total Harga (Rp)			VOLUME	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Total Harga (Rp)
B.	Pekerjaan Kolom					B.	Pekerjaan Kolom					B.	Pekerjaan Kolom				
1.	Pekerjaan Kolom L1.1					1.	Pekerjaan Kolom L1.1					1.	Pekerjaan Kolom L1.1				
a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm				
b.	Beton f'c 25 Mpa	87.48	m ³	1.301.619	113.865.663,57	b.	Beton f'c 25 Mpa	163,30	m ³	1.301.619	212.549.238,66	b.	Beton f'c 25 Mpa	163,30	m ³	1.301.619	212.549.238,66
c.	Pondasi	32.145,36	kg	15.609	501.755.375,06	c.	Pondasi	40.181,70	kg	15.609	627.194.218,82	c.	Pondasi	26.787,80	kg	15.609	418.129.479,21
2.	Pekerjaan Kolom L1.2					2.	Pekerjaan Kolom L1.2					2.	Pekerjaan Kolom L1.2				
a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm				
b.	Beton f'c 25 Mpa	74,52	m ³	1.301.619	96.996.676,37	b.	Beton f'c 25 Mpa	104,33	m ³	1.301.619	135.795.346,92	b.	Beton f'c 25 Mpa	104,33	m ³	1.301.619	135.795.346,92
c.	Pondasi	23.415,45	kg	15.609	365.496.595,20	c.	Pondasi	21.464,18	kg	15.609	335.033.045,60	c.	Pondasi	15.610,30	kg	15.609	243.660.396,80
3.	Pekerjaan Kolom L1.3					3.	Pekerjaan Kolom L1.3					3.	Pekerjaan Kolom L1.3				
a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm				
b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25	b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25	b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25
c.	Pondasi	25.606,62	kg	15.609	399.692.497,96	c.	Pondasi	23.472,73	kg	15.609	366.384.789,79	c.	Pondasi	12.803,31	kg	15.609	199.846.248,98
4.	Pekerjaan Kolom L1.4					4.	Pekerjaan Kolom L1.4					4.	Pekerjaan Kolom L1.4				
a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm				
b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25	b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25	b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25
c.	Pondasi	22.765,02	kg	15.609	355.338.078,67	c.	Pondasi	20.867,93	kg	15.609	325.726.572,11	c.	Pondasi	11.382,51	kg	15.609	177.669.039,33
5.	Pekerjaan Kolom L1.5					5.	Pekerjaan Kolom L1.5					5.	Pekerjaan Kolom L1.5				
a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm				
b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25	b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25	b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25
c.	Pondasi	25.606,62	kg	15.609	399.692.497,96	c.	Pondasi	23.472,73	kg	15.609	366.384.789,79	c.	Pondasi	12.803,31	kg	15.609	199.846.248,98
6.	Pekerjaan Kolom L1.6					6.	Pekerjaan Kolom L1.6					6.	Pekerjaan Kolom L1.6				
a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm				
b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25	b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25	b.	Beton f'c 25 Mpa	72,45	m ³	1.301.619	94.302.324,25
c.	Pondasi	21.879,83	kg	15.609	341.521.196,22	c.	Pondasi	20.056,51	kg	15.609	313.061.096,54	c.	Pondasi	10.939,91	kg	15.609	170.768.598,11
7.	Pekerjaan Kolom L1. Dag					7.	Pekerjaan Kolom L1. Dag					7.	Pekerjaan Kolom L1. Dag				
a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm					a.	Kolom K1 Uk. 500mm x 600mm				
b.	Beton f'c 25 Mpa	8,28	m ³	1.301.619	10.777.408,49	b.	Beton f'c 25 Mpa	8,28	m ³	1.301.619	10.777.408,49	b.	Beton f'c 25 Mpa	8,28	m ³	1.301.619	10.777.408,49
c.	Pondasi	2.699,14	kg	15.609	42.130.789,08	c.	Pondasi	2.474,21	kg	15.609	38.619.889,99	c.	Pondasi	1.349,57	kg	15.609	21.065.394,54
Total Pekerjaan Kolom					3.004.470.075,57	Total Pekerjaan Kolom					3.108.735.693,72	Total Pekerjaan Kolom					2.167.308.097,02

Sumber : Pengolahan data

Tabel 8. Detail Biaya Elemen Struktur Kolom Pada DED eksisting dan Review DED

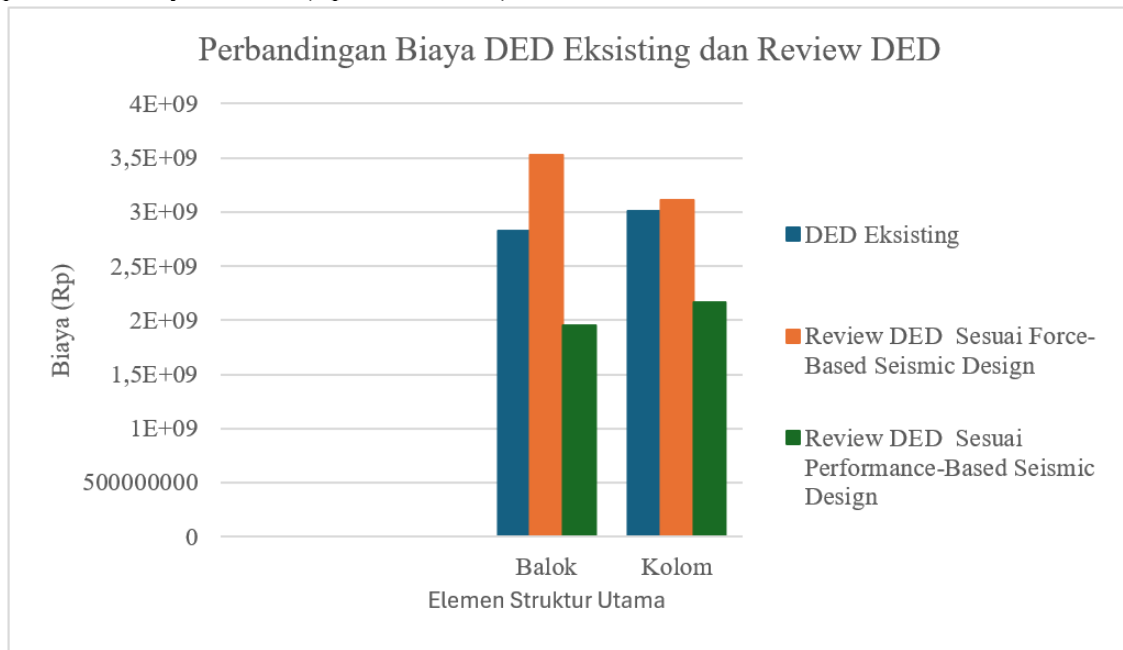
NO.	URAIAN PEKERJAAN	DED Eksisting				NO.	URAIAN PEKERJAAN	Review DED (Force-Based Seismic Design)				NO.	URAIAN PEKERJAAN	Review DED (Performance-Based Seismic Design)			
		VOLUME	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Total Harga (Rp)			VOLUME	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Total Harga (Rp)			VOLUME	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Total Harga (Rp)
A.	Pekerjaan Balok					A.	Pekerjaan Balok					A.	Pekerjaan Balok				
1.	Pekerjaan Balok L1.2					1.	Pekerjaan Balok L1.2					1.	Pekerjaan Balok L1.2				
a.	Beton f'c 25 Mpa	71,03	m ³	1.301.619	92.352.374,78	a.	Beton f'c 25 Mpa	93,56	m ³	1.301.619	121.778.695,90	a.	Beton f'c 25 Mpa	93,56	m ³	1.301.619	121.778.695,90
b.	Pondasi	14.199,18	kg	15.609	221.631.281,55	b.	Pondasi	22.028,62	kg	15.609	343.675.115,16	b.	Pondasi	8.282,85	kg	15.609	129.286.665,99
2.	Pekerjaan Balok L1.3					2.	Pekerjaan Balok L1.3					2.	Pekerjaan Balok L1.3				
a.	Beton f'c 25 Mpa	65,23	m ³	1.301.619	84.910.719,92	a.	Beton f'c 25 Mpa	50,71	m ³	1.301.619	66.031.691,38	a.	Beton f'c 25 Mpa	50,71	m ³	1.301.619	66.031.691,38
b.	Pondasi	12.961,52	kg	15.609	202.312.686,55	b.	Pondasi	11.425,43	kg	15.609	178.307.812,12	b.	Pondasi	6.080,66	kg	15.609	95.136.543,28
3.	Pekerjaan Balok L1.4					3.	Pekerjaan Balok L1.4					3.	Pekerjaan Balok L1.4				
a.	Beton f'c 25 Mpa	72,03	m ³	1.301.619	93.751.739,25	a.	Beton f'c 25 Mpa	91,03	m ³	1.301.619	118.491.781,55	a.	Beton f'c 25 Mpa	91,03	m ³	1.301.619	118.491.781,55
b.	Pondasi	13.806,29	kg	15.609	214.408.039,75	b.	Pondasi	24.325,70	kg	15.609	379.688.741,95	b.	Pondasi	8.050,17	kg	15.609	125.654.689,66
4.	Pekerjaan Balok L1.5					4.	Pekerjaan Balok L1.5					4.	Pekerjaan Balok L1.5				
a.	Beton f'c 25 Mpa	64,31	m ³	1.301.619	83.700.684,43	a.	Beton f'c 25 Mpa	50,02	m ³	1.301.619	65.102.087,89	a.	Beton f'c 25 Mpa	50,02	m ³	1.301.619	65.102.087,89
b.	Pondasi	12.796,85	kg	15.609	199.745.359,56	b.	Pondasi	11.278,47	kg	15.609	176.045.104,49	b.	Pondasi	6.396,43	kg	15.609	99.872.679,78
5.	Pekerjaan Balok L1.6					5.	Pekerjaan Balok L1.6					5.	Pekerjaan Balok L1.6				
a.	Beton f'c 25 Mpa	56,14	m ³	1.301.619	73.067.793,74	a.	Beton f'c 25 Mpa	70,95	m ³	1.301.619	92.349.560,01	a.	Beton f'c 25 Mpa	70,95	m ³	1.301.619	92.349.560,01
b.	Pondasi	10.775,52	kg	15.609	168.191.629,52	b.	Pondasi	18.093,97	kg	15.609	282.475.885,76	b.	Pondasi	6.285,72	kg	15.609	98.112.534,12
6.	Pekerjaan Balok L1.7					6.	Pekerjaan Balok L1.7					6.	Pekerjaan Balok L1.7				
a.	Beton f'c 25 Mpa	49,19	m ³	1.301.619	64.021.092,99	a.	Beton f'c 25 Mpa	38,26	m ³	1.301.619	49.796.524,55	a.	Beton f'c 25 Mpa	38,26	m ³	1.301.619	49.796.524,55
b.	Pondasi	9.797,34	kg	15.609	152.928.203,38	b.	Pondasi	8.694,89	kg	15.609	135.781.150,93	b.	Pondasi	4.899,67	kg	15.609	76.365.105,69
7.	Pekerjaan Balok L1.8					7.	Pekerjaan Balok L1.8					7.	Pekerjaan Balok L1.8				
a.	Beton f'c 25 Mpa	46,91	m ³	1.301.619	61.095.686,66	a.	Beton f'c 25 Mpa	59,32	m ³	1.301.619	77.217.909,28	a.	Beton f'c 25 Mpa	59,32	m ³	1.301.619	77.217.909,28
b.	Pondasi	8.992,67	kg	15.609	140.366.175,68	b.	Pondasi	15.851,34	kg	15.609	247.422.799,90	b.	Pondasi	5.245,73	kg	15.609	81.880.269,15
8.	Pekerjaan Balok L1.9					8.	Pekerjaan Balok L1.9					8.	Pekerjaan Balok L1.9				
a.	Beton f'c 25 Mpa	41,82	m ³	1.301.619	54.615.135,41	a.	Beton f'c 25 Mpa	32,29	m ³	1.301.619	42.028.835,10	a.	Beton f'c 25 Mpa	32,29	m ³	1.301.619	42.028.835,10
b.	Pondasi	8.303,61	kg	15.609	128.980.220,88	b.	Pondasi	7.283,11	kg	15.609	113.681.710,60	b.	Pondasi	4.131,80	kg	15.609	64.497.134,49
9.	Pekerjaan Balok L1.10					9.	Pekerjaan Balok L1.10					9.	Pekerjaan Balok L1.10				
a.	Beton f'c 25 Mpa	46,94	m ³	1.301.619	61.095.686,66	a.	Beton f'c 25 Mpa	59,32	m ³	1.301.619	77.217.909,28	a.	Beton f'c 25 Mpa	59,32	m ³	1.301.619	77.217.909,28
b.	Pondasi	8.992,67	kg	15.609	140.366.175,68	b.	Pondasi	15.851,34	kg	15.609	247.422.799,90	b.	Pondasi	5.245,73	kg	15.609	81.880.269,15
10.	Pekerjaan Balok L1.11					10.	Pekerjaan Balok L1.11					10.	Pekerjaan Balok L1.11				
a.	Beton f'c 25 Mpa	41,82	m ³	1.301.619	54.615.135,41	a.	Beton f'c 25 Mpa	32,29	m ³	1.301.619	42.028.835,10	a.	Beton f'c 25 Mpa	32,29	m ³	1.301.619	42.028.835,10
b.	Pondasi	8.303,61	kg	15.609	128.980.220,88	b.	Pondasi	7.283,11	kg	15.609	113.681.710,60	b.	Pondasi	4.131,80	kg	15.609	64.497.134,49
Total Pekerjaan Balok					2.874.989.349,65	Total Pekerjaan Balok					3.523.812.591,66	Total Pekerjaan Balok					1.949.971.663,51

Sumber : Pengolahan data

Dari Tabel 7 dan Tabel 8 dapat dilihat bahwa dibandingkan DED eksisting, review DED dengan pendekatan force-based seismic design (SNI 1726:2019) pada elemen balok mengalami kenaikan biaya 24,74% akibat perubahan dimensi dan jumlah tulangan (Rp 698.823.242), sedangkan pendekatan performance-based seismic design (analisis pushover-FEMA 440EL) mengalami

penurunan biaya 30,98% (Rp 875.067.686) dan juga dapat dilihat bahwa dibandingkan DED eksisting, review DED dengan pendekatan force-based seismic design (SNI 1726:2019) pada elemen kolom mengalami kenaikan biaya 3,47% akibat perubahan dimensi dan jumlah tulangan (Rp 104.265.618), sedangkan pendekatan performance-based seismic design (analisis

pushover-FEMA 440EL mengalami penurunan biaya 27,86% (Rp 837.161.378).



Gambar 8. Grafik Perbandingan Biaya

Kesimpulan Penelitian

Berdasarkan pengujian Hukum Pareto terhadap RAB pekerjaan struktur atas, biaya terbesar berturut-turut terdapat pada pelat lantai, balok, dan kolom dengan total 85,08% dari biaya struktur atas. Namun, elemen struktur dominan penahan gaya gempa langsung, yaitu balok dan kolom, memiliki porsi biaya 49,56% dari total biaya struktur atas. Analisis pushover prosedur FEMA 440EL pada DED eksisting tidak menghasilkan Performance Point dan menunjukkan plastifikasi awal pada kolom lantai dasar yang menyebabkan soft storey pada fase pasca-elastik. Sebaliknya, pada review DED berbasis force-based seismic design (SNI 1726:2019) dan Review DED dengan pendekatan performance-based seismic design (Analisis Pushover-FEMA 440EL) diperoleh Performance Point dengan terjadinya plastifikasi pada tumpuan balok lantai 2 (SCWB terpenuhi), yang menunjukkan perilaku daktail dengan level kinerja *Immediate Occupancy* (IO). Dibandingkan DED eksisting, pendekatan

force-based seismic design meningkatkan biaya balok sebesar 24,74% (Rp 698.823.242) dan kolom sebesar 3,47% (Rp 104.265.618), sedangkan pendekatan performance-based seismic design (Analisis Pushover-FEMA 440EL) menurunkan biaya balok sebesar 30,98% (Rp 875.067.686) dan kolom sebesar 27,86% (Rp 837.161.378).

Daftar Pustaka

- Applied Technology Council-40*. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. California: Report SSC 96-01.
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C.: Dipersiapkan oleh *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, dan dipublikasi oleh *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*.
- FEMA 440. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington, D.C.: Dipersiapkan oleh *Applied Technology Council (ATC-55 Project)* untuk *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*.
- Firda, A., & Saputra, S. (2018). Penerapan Value Engineering pada Pekerjaan Konstruksi Studi Kasus Proyek Pembangunan Rumah Sakit Umum Provinsi Sumatera Selatan. *Jurnal Forum*

- \Mekanika, 7(2). DOI :
<https://doi.org/10.33322/forummekanika.v7i2.201>
- Indah dkk. 2022. Evaluasi Kinerja Struktur Beton Bertulang Dengan Pushover Analysis Berdasarkan ATC-40, FEMA 356 dan FEMA 440. *Jurnal Flyover (JFO)*, Volume 02 Nomor 02. Program Pascasarjana Universitas Negri Makasar. DOI:
<https://doi.org/10.52103/jfo.v2i2.1347>
- Juana, S, Jimmy. (2005). Panduan Sistem Bangunan Tinggi Untuk Arsitek dan Praktisi Bangunan. Jakarta : Penerbit Erlangga
- Nasution, A. (2016). Rekayasa Gempa & Sistem Struktur Tahan Gempa. Bandung : Penerbit ITB.
- Pramesti et al,. (2022). Kajian Efektivitas Proyek Menggunakan Konsep Value Engineering pada Proyek Gedung (Studi Kasus: Gedung Polres Kota Bekasi).
- Matriks Teknik Sipil, 10(3), 196–202. DOI :
<https://doi.org/10.20961/mateksi.v10i3.59851>
- Retno et al,. (2022). Analisis Kinerja Gedung Beton Bertulang Dengan Sistem Penahan Beban Lateral Dinding Geser Dan Bresing Terhadap Beban Gempa. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Kontruksi*, 10(1), 011-018. DOI:
<https://doi.org/10.30742/axial.v10i1.2171>
- Rahmat et al,. (2022). Value Engineering Sistem Struktur Bangunan Gedung Rumah Sakit Pendidikan Ibnu Sina. *Jurnal Teknik Sipil Macca*, Volume 07 Nomor 03. DOI:
<https://doi.org/10.33096/fs7nh708>
- Sucipto, Bangun. (2008). Optimasi Infrastruktur *Value Engineering*, Inovasi dan Akselerasi Konstruksi untuk Efisiensi Investasi. Jakarta : SAVE -I. COM dan Bee Media Indonesia
- SEAOC. (1995). *Vision 2000 – A Framework for Performance Based Earthquake Engineering*. Structural Engineers Association of California
- SNI 1726:2019. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 1727:2020. Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- SNI 2052:2017 Persyaratan baja tulangan beton. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- Ulza, Adrian. (2021). Teori dan Praktek Evaluasi Struktur Beton Bertulang Berbasis Desain Kinerja, Sleman, Yogyakarta : Deepublish.