

Analisis Performa *Eccentrically Braced Frames (EBF)* Vertikal *Link* Menggunakan *Wide Flange (WF)* *Link*

Pramesta Armanisag Pangestuti^{1,*}, Budi Suswanto¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: pramestaarma@gmail.com

Info Artikel		Abstract
Diajukan	06 Juli 2021	<i>Eccentrically Braced Frames (EBF)</i> is an earthquake resistant steel structure that has good shear capacity and ductility. The EBF structure makes the link the element that is damaged first than the other elements. EBF has 2 types of links, namely vertical links and horizontal links. The horizontal link of the EBF rotates in the vertical direction after a large earthquake occurs so that it interferes with other elements above it and makes it difficult to repair or replace the link, the solution is to use a vertical link which allows for link repair or replacement, without changing the beam section. An analysis was carried out in the form of a 10-story building structure with a vertical link EBF structure system using SAP 2000 software in the form of linear and non-linear analysis. Then, a cyclic load analysis was carried out for the 1-story frame specimen of the vertical link EBF structure system using Abaqus CAE software. The results of the analysis showed that the modeling of the 10-storey building structure and the 1-story frame specimen experienced element failure first in the link, this is in accordance with the concept of Eccentrically Braced Frames (EBF) structure.
Diperbaiki	19 Juli 2021	
Disetujui	20 Juli 2021	

Keywords: Eccentrically Braced Frames, vertical link, finite element method, linear and non-linear analysis, cyclic load

Abstrak

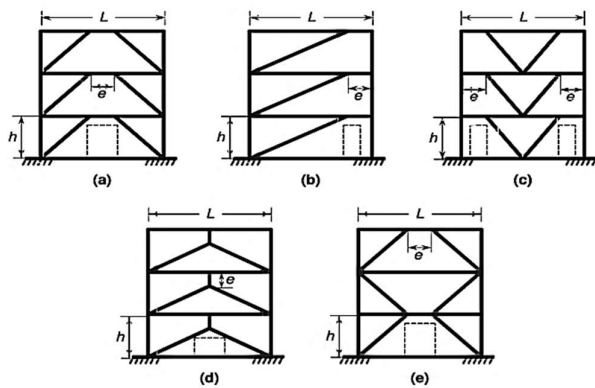
Eccentrically Braced Frames (EBF) merupakan struktur baja tahan gempa yang memiliki kapasitas geser dan daktilitas yang baik. Struktur EBF menjadikan *link* sebagai elemen yang mengalami kerusakan terlebih dahulu dari elemen lainnya. EBF mempunyai 2 tipe *link*, yaitu *link* vertikal dan *link* horizontal. *Link* horizontal EBF berotasi ke arah vertikal pasca terjadi gempa besar sehingga mengganggu elemen lain di atasnya dan sulit melakukan perbaikan atau penggantian *link*, solusinya digunakan *link* vertikal yang memungkinkan untuk perbaikan atau penggantian *link*, tanpa mengubah bagian balok. Dilakukan analisis berupa struktur gedung 10 lantai dengan sistem struktur EBF *link* vertikal menggunakan software SAP 2000 berupa analisis linier dan non linier. Selanjutnya dilakukan analisis beban siklik untuk spesimen frame 1 lantai sistem struktur EBF *link* vertikal menggunakan software Abaqus CAE. Hasil analisis menunjukkan bahwa pemodelan struktur gedung EBF 10 lantai dan spesimen frame EBF 1 lantai mengalami kegagalan elemen terlebih dahulu terjadi pada *link*, hal ini sesuai dengan konsep struktur *Eccentrically Braced Frames (EBF)*.

Kata kunci: *Eccentrically Braced Frames*, *link* vertikal, metode elemen hingga, analisis linier dan non linier, beban siklik

1. Pendahuluan

Konstruksi struktur baja merupakan salah satu sistem struktur tahan gempa dengan kinerja yang baik, dengan mengandalkan sifat kekuatan dan daktilitas material baja yang tinggi. Struktur baja juga mampu mendisipasi energi yang besar untuk menghindari dan meminimalisir terjadinya keruntuhan. Dengan sifat-sifat material baja yang daktil, kekuatan yang tinggi, dan kemampuan dalam mendisipasi energi yang baik, maka struktur baja sangat cocok apabila digunakan untuk daerah-daerah dengan tingkat seismisitas yang tinggi. Jenis-jenis model sistem struktur baja tahan gempa, antara lain: *Momen Resisting Frames (MRF)*, *Centrically Braced Frames (CBF)*, *Eccentrically Braced Frames (EBF)*, *Buckling Restrained Braced Frames (BRBF)*, dan *Steel Plate Shear Walls (SPSW)* [1].

Eccentrically Braced Frames (EBF) merupakan sistem yang membatasi perilaku inelastik hanya terjadi pada balok *link* yang berada di antara dua pengekang eksentrik, sedangkan balok bagian luar, kolom, dan pengekang diagonal tetap elastik selama beban seismik bekerja [2]. *Link* didefinisikan sebagai jarak yang dibuat di antara 2 ujung *bracing*, atau jarak antara *bracing* dengan kolom, atau jarak antara *bracing* dengan balok. Panjang link dinotasikan dengan huruf "e". Fungsi utama dari *link* adalah sebagai elemen yang didesain mengalami leleh terlebih dahulu dari semua komponen *Eccentrically Braced Frames (EBF)*, yang memiliki kapasitas deformasi plastis dan dapat mendisipasi energi yang dihasilkan oleh gempa bumi, dengan konfigurasi tipe link pada struktur EBF seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [3].



Gambar 1. Konfigurasi *Eccentrically Braced Frames* [1]

Eccentrically Braced Frames (EBF) secara umum mempunyai 2 tipe, yaitu EBF dengan horizontal *link* (H-EBF) dan EBF dengan vertikal *link* (V-EBF). *Eccentrically Braced Frames* (EBF) dengan horizontal *link* (H-EBF), *link* menjadi satu kesatuan dengan balok sehingga melakukan perbaikan atau penggantian *link* yang mengalami kerusakan pada H-EBF pasca terjadinya gempa besar bisa sangat sulit dan mengganggu sistem struktur lain [4]. Berdasarkan kelemahan dari H-EBF tersebut, maka digunakan V-EBF dimana pada V-EBF memungkinkan untuk perbaikan atau penggantian elemen *link* yang rusak pasca terjadi gempa besar, tanpa mengganti atau mengubah bagian dari balok [5]. V-EBF merupakan sistem *Eccentrically Braced Frames* dimana *link* dipasang secara vertikal menghubungkan *bracing* dengan balok.

Penelitian yang dilakukan oleh Shayanfar dkk. [6] menunjukkan bahwa *Eccentrically Braced Frames* dengan *link* vertikal (V-EBF) mempunyai kelebihan dari sistem H-EBF, antara lain pada daktilitas, kekuatan elastis yang tinggi, fungsionalitas sebagai sistem *fuse* yang daktil, dan keefektifan dalam proses bongkar pasang pasca terjadi kerusakan tanpa mengganggu elemen struktur lainnya. Penggunaan *link* vertikal, dimensi penampang *link* dapat didesain dengan fleksibel tanpa harus memiliki dimensi dan profil penampang yang sama dengan balok. Penelitian *Eccentrically Braced Frames* (EBF) dengan *link* vertikal juga dilakukan oleh Wang [5] dengan menggunakan *High Strength Steel* (HSS) dan dilakukan secara eksperimental. *Link* yang digunakan dalam eksperimental tersebut adalah menggunakan jenis *link* pendek/*link* geser. Hasil dari eksperimental disebutkan bahwa perilaku Y-HSS-EBF menunjukkan kinerja yang baik untuk deformasi plastis. Kurva histeresis antara gaya dan *displacement* menunjukkan perilaku deformasi plastis yang baik dan tidak menghasilkan *pinching* atau penjepitan pada kurva histeresis.

2. Metode

Studi ini akan menganalisis struktur *Eccentrically Braced Frames* (EBF) dengan menggunakan konsep vertikal *link*, dimana *link* dipasang secara vertikal menghubungkan balok dengan *bracing* eksentris. Dilakukan analisis pada struktur *Eccentrically Braced Frames* (EBF), yaitu dengan menggunakan *link* profil *Wide Flange* (WF) sesuai dengan *preliminary design* yang dilakukan, dan analisis tidak mendetailkan atau menghitung sistem sambungan. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui perilaku atau performa dari *Eccentrically Braced Frames* (EBF) *link* vertikal dengan diharapkan hasil struktur dengan kapasitas geser, disipasi energi, dan daktilitas yang baik.

Analisis dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* SAP 2000 dan Abaqus CAE. *Software* SAP 2000 digunakan untuk analisis linier dan non linier struktur gedung 3 dimensi 10 lantai *Eccentrically Braced Frames* (EBF) *link* vertikal, dengan denah mengacu pada penelitian oleh Suswanto dkk. [7]. Analisis linier pada SAP 2000 mengacu pada persyaratan SNI 1726: 2019 untuk pembebanan gempa dan SNI 1727: 2018 untuk pembebanan struktur gedung yang berupa beban mati tambahan dan beban hidup. Analisis non linier berupa *pushover* dengan tujuan untuk mengetahui perilaku struktur dan keruntuhan elemen pada struktur. Konsep *Eccentrically Braced Frames* (EBF) adalah pelelehan atau plastifikasi terlebih dahulu terjadi pada elemen *link*, sedangkan elemen lain masih dalam kondisi elastis. Analisis selanjutnya adalah analisis berupa pemberian beban siklik pada Abaqus CAE. Analisis ini menggunakan pemodelan *frame* 1 lantai yang mengalami kegagalan dari hasil analisis pada SAP 2000, dan spesimen dinotasikan dengan V-EBF-WF. Beban siklik atau *loading protocol* yang digunakan untuk analisis pada Abaqus CAE adalah mengacu pada AISC 341-16.

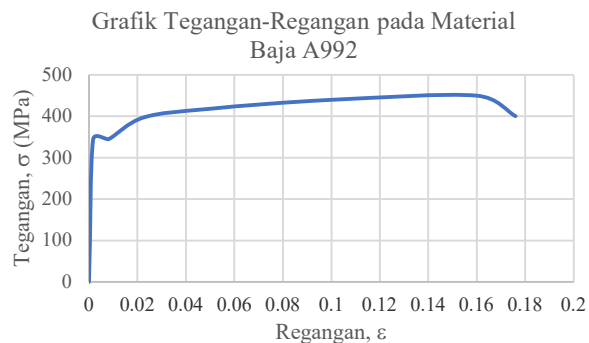
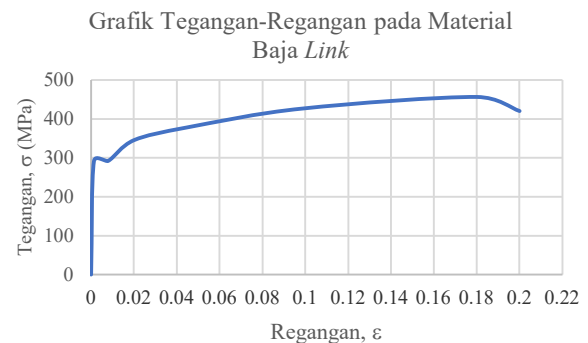
Struktur *Eccentrically Braced Frames* (EBF) yang dianalisis pada SAP 2000 menggunakan kolom *King Cross* (KC) dengan bentang 8 meter dan tinggi 4 meter untuk masing-masing lantai, sedangkan elemen balok, *bracing*, dan *link* menggunakan profil *Wide Flange* (WF) dengan tipe *link* vertikal. Klasifikasi tipe *link* dan jenis pelelehan *link* yang terjadi dapat dilihat pada **Tabel 1**, untuk detail pendefinisian material yang digunakan pada analisis pemodelan dapat dilihat pada **Tabel 2**, serta diagram tegangan-regangan untuk masing-masing material yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**. Jenis *link* yang digunakan adalah *link* pendek atau *shear link*, dimana *link* tersebut memiliki kegagalan dominan geser sehingga perencanaan panjang *link* disesuaikan dengan persyaratan *link* pendek.

Tabel 1. Klasifikasi Tipe Link berdasarkan AISC 341-16 [8]

No.	Nama Link	Panjang Link	Jenis Pelelehan
1	Link pendek	$e < 1,6 M_p/V_p$	dominan geser
2	Link menengah	$1,6 M_p/V_p < e < 2,6 M_p/V_p$	kombinasi geser dan lentur
3	Link Panjang	$2,6 M_p/V_p < e$	dominan lentur

Tabel 2. Pendefinisian Material

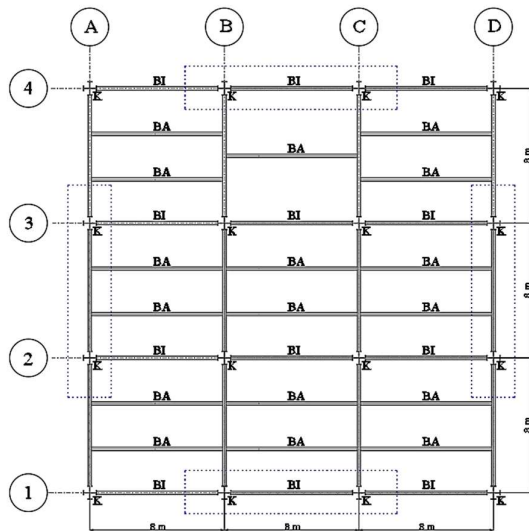
BAJA		BAJA LINK	
f_y (MPa)	345	f_y (MPa)	292
f_u (MPa)	450	f_u (MPa)	456
Berat Jenis (kg/m ³)	7.850	Berat Jenis (kg/m ³)	7.850
Young's Modulus E (MPa)	200.000	Young's Modulus E (MPa)	200.000
Poisson's Ratio ν	0,3	Poisson's Ratio	0,3
ϵ max	18%	ϵ max	16%

**Gambar 2.** Kurva Tegangan-Regangan Material Baja A992 [7]**Gambar 3.** Kurva Tegangan Regangan Material Baja Link A36 [7]**Tabel 3.** Dimensi Rencana Profil Masing-Masing Elemen

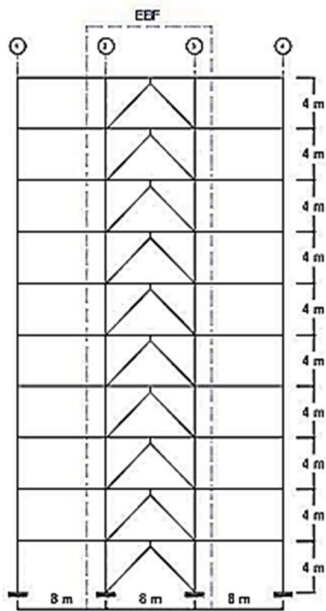
Lantai	Kolom	Balok	Link	Bracing
1 – 4	KC 800x300x14x26	WF 600x200x11x17	WF 500x200x10x16	WF 600x200x11x17
5 – 7	KC 700x300x13x24	WF 600x200x11x17	WF 450x200x9x14	WF 500x200x10x16
8 – 10	KC 588x300x12x20	WF 500x200x10x16	WF 400x200x8x13	WF 450x200x9x14

Tabel 3 merupakan *preliminary design* dimensi masing-masing elemen yang digunakan dalam analisis menggunakan SAP 2000. **Gambar 4** dan **Gambar 5** merupakan pemodelan struktur gedung 10 lantai dengan sistem *Eccentrically Braced Frames* (EBF) link vertikal yang mengacu pada penelitian Suswanto dkk. [7]. Jenis material yang digunakan untuk pemodelan pada SAP 2000 ditunjukkan pada **Tabel 2**. Pemodelan V-EBF 10 lantai kemudian diberi pembebanan

sesuai dengan SNI 1726:2019 dan SNI 1727:2018. Hasil analisis dikontrol terhadap syarat partisipasi massa, periode, gaya gempa dasar, simpangan antar lantai, *steel check design*, serta dilakukan analisis non linier *pushover* untuk mengetahui pola kegagalan pada struktur *Eccentrically Braced Frames* (EBF). Kemudian diambil 1 *frame* yang mengalami kegagalan dari hasil analisis untuk dilanjutkan analisis beban siklik pada *software* Abaqus CAE.



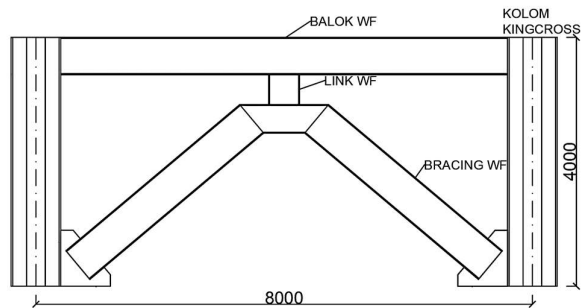
Gambar 4. Denah struktur pemodelan pada SAP 2000 [7]



Gambar 5. Pemodelan portal gedung 10 lantai dengan sistem V-EBF [7]

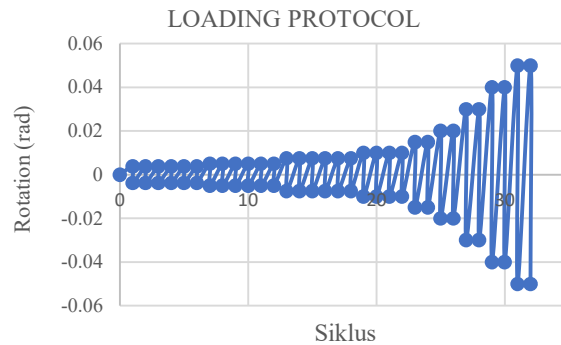
Pemodelan spesimen frame V-EBF-WF pada Abaqus CAE dimulai dari tahapan pemodelan geometri (*Modul Part*). Tahap ini merupakan tahapan untuk pembuatan bentuk dari masing-masing elemen pada *frame* berdasarkan dimensi yang telah ditentukan. Penggambaran *part* yang berupa elemen solid 3 dimensi pada Abaqus CAE dapat dilakukan dengan langsung menggambar masing-masing koordinat dari penampang atau dapat dilakukan dengan *import* gambar dari *software* AutoCad, kemudian menyatukan part-part yang

telah dibuat dalam bentuk *frame* dengan modul *Assembly*. Kemudian dilanjutkan dengan menginput *material property* seperti tercantum pada **Tabel 3 Part** yang telah di *assembly* kemudian dilakukan pemasangan interaksi *surface to surface* tipe *tie constraint*. Tahap selanjutnya adalah peletakan *Boundary Condition* (BC) untuk mendefinisikan letak tumpuan dan letak pemberian beban siklik. Tumpuan *frame* berada pada ujung bawah kolom atau kaki kolom dan diberikan jenis tumpuan *fixed* atau jepit. Ujung atas kolom diberi peletakan *Boundary Condition* (BC) untuk pemberian beban siklik.



Gambar 6. Pemodelan V-EBF-WF

Loading protocol yang diberikan ketika analisis pada Abaqus CAE mengacu pada AISC 341-16. Pembebanan diberikan secara bertahap dan diawali dengan beban dorong sebesar 0,00375 rad. Total beban siklik yang diberikan selama analisis adalah sebanyak 32 siklus, yang terdiri dari 32 dorongan dan 32 tarikan. Detail rincian nilai *loading protocol* dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Tabel 4**. Tahap selanjutnya dalam proses pemodelan *frame* adalah *meshing*. *Meshing* merupakan proses pembagian elemen *part* menjadi elemen-elemen kecil untuk pendetailan atau keakuratan dalam hasil analisis. Tipe elemen yang digunakan adalah C3D8R untuk balok, kolom, dan *bracing*, serta tipe elemen C3D6 untuk *link*.



Gambar 7. *Loading protocol* berdasarkan AISC 341-16 [8]

Evaluasi hasil analisis pemodelan V-EBF-WF yang akan ditinjau adalah kapasitas geser *frame*, kurva histeresis,

disipasi energi, pola kegagalan link, dan daktilitas struktur. Selanjutnya dibandingkan performa dari masing-masing spesimen frame V-EBF sehingga didapatkan hasil frame dengan tipe *link* yang direkomendasikan berdasarkan parameter evaluasi.

Tabel 4. Loading protocol yang digunakan analisis frame V-EBF [8]

No.	Rotation (rad)	Displacement (mm)	Cyclic Number
1	0.00375	15	6
2	0.005	20	6
3	0.0075	30	6
4	0.01	40	4
5	0.015	60	2
6	0.02	80	2
7	0.03	120	2
8	0.04	160	2
9	0.05	200	2
Total siklus			32

3. Hasil dan Pembahasan

A. Analisis Pemodelan pada SAP 2000

1) Perencanaan Panjang Link

Berikut merupakan perhitungan panjang *link* (*e*) yang digunakan pada pemodelan:

$$f_y = 292 \text{ MPa}$$

$$d = 500 \text{ mm}$$

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$t_w = 10 \text{ mm}$$

$$t_f = 16 \text{ mm}$$

$$M_p = Z_x \times f_y$$

dimana:

$$\begin{aligned} Z_x &= (b \cdot t_f)(h - t_f) + t_w \left(\frac{1}{2}h - t_f\right) \left(\frac{1}{2}h - t_f\right) \\ &= (200 \times 16)(500 - 16) + 10 \left(\frac{1}{2} \times 500 - 16\right) \left(\frac{1}{2} \times 500 - 16\right) \\ &= 2096360 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_p &= Z_x \times f_y \\ &= 2096360 \text{ mm}^3 \times 292 \text{ N/mm}^2 \\ &= 612137120 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_p &= 0,6 \times f_y \times (d - 2t_f) \times t_w \\ &= 0,6 \times 292 \times (500 - 2 \times 16) \times 10 \\ &= 819936 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e &= 1,6 \times \frac{M_p}{V_p} \\ &= 1,6 \times \frac{612137120}{819936} \end{aligned}$$

$$= 746,57 \text{ mm}$$

Maka digunakan panjang *link* (*e*) sebesar 400 mm < 746,57 mm.

2) Pembebanan Struktur

Pembebanan struktur yang berupa beban mati tambahan dan beban hidup berdasarkan fungsi gedung perkantoran yang mengacu pada SNI 1727:2018 ditunjukkan pada **Tabel 5**. Pembebanan Gempa yang digunakan mengambil dari wilayah Surabaya, dengan fungsi gedung sebagai gedung perkantoran, didetailkan pada **Tabel 6**.

Tabel 5 Pembebanan struktur [9]

	Beban	Nilai
Atap	Superdead	0,39 kN/m ²
	Live	0,96 kN/m ²
Lantai	Superdead	1,44 kN/m ²
	Live	4,79 kN/m ²

Tabel 6 Pembebanan gempa [10]

Parameter	Nilai
Wilayah	Surabaya
S_s	0,704649 g
S_I	0,304513 f
Kategori resiko	II
I_e	1
Kelas situs	SE
F_a	1,372561
F_v	2,781947
S_{MS}	0,967174 g
S_{Ml}	0,84714 g
S_{DS}	0,644783 g
S_{Dl}	0,56476 g
T_0	0,175178 s
T_s	0,875891 s
Sistem rangka	EBF
R	8
C_d	4

3) Kontrol Partisipasi Massa

SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1 menjelaskan analisis diizinkan untuk memasukkan jumlah ragam yang minimum untuk mencapai massa ragam terkombinasi paling sedikit 90 % dari massa aktual dalam masing-masing arah dari respons yang ditinjau.

Tabel 7 merupakan nilai rasio partisipasi massa hasil analisis struktur V-EBF 10 lantai pada *software* SAP 2000. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur V-EBF telah memenuhi syarat kontrol pasrtisipasi massa dari SNI

1726:2019 dengan rasio 90% pada masing-masing arah x dan y.

Tabel 7 Rasio partisipasi massa struktur V-EBF

Table: Modal Participating Mass Ratios

Output Case	Step Type	Step Num	Period	Sum UX	Sum UY
MODAL	Mode	1	1,291336	0,7539	4E-19
MODAL	Mode	2	1,280692	0,7539	0,751
MODAL	Mode	3	0,826073	0,7541	0,751
MODAL	Mode	4	0,430031	0,8976	0,751
MODAL	Mode	5	0,424604	0,8976	0,897
MODAL	Mode	6	0,305123	0,8976	0,897
MODAL	Mode	7	0,304966	0,8976	0,897
MODAL	Mode	8	0,304898	0,8976	0,897
MODAL	Mode	9	0,30484	0,8976	0,897
MODAL	Mode	10	0,303243	0,8976	0,897
MODAL	Mode	11	0,303154	0,8976	0,897
MODAL	Mode	12	0,290297	0,8976	0,897
MODAL	Mode	13	0,290165	0,8976	0,897
MODAL	Mode	14	0,290104	0,8976	0,898
MODAL	Mode	15	0,276138	0,8976	0,898
MODAL	Mode	16	0,240277	0,9407	0,898
MODAL	Mode	17	0,235535	0,9407	0,904

4) Kontrol Periode

Pemberian batasan nilai waktu getar fundamental (periode) bertujuan untuk mencegah perilaku struktur gedung yang terlalu fleksibel yang mengarah pada kenyamanan pengguna atau penghuni bangunan. SNI 1726:2019 menuliskan batasan nilai waktu getar fundamental (periode) pada pasal 7.8.2.1 dengan rumusan pada persamaan 1.

$$T_a = C_t \cdot h_n^x \quad (1)$$

Dimana:

$$C_t = 0,0731 \text{ (untuk nilai EBF)}$$

$$x = 0,75 \text{ (untuk nilai EBF)}$$

$$h_n = 40 \text{ m}$$

Batas nilai T_a :

$$T_{a \min} = C_t \cdot h_n^x = 1,1627 \text{ s}$$

$$T_{a \max} = T_{a \min} \cdot C_u = 1,628 \text{ s} \text{ (} C_u \text{ didapat dari Tabel 17 SNI 1726:2019, bergantung pada nilai } S_{D1} \text{)}$$

$$T_{a \min} < T \text{ hasil analisis SAP 2000} < T_{a \max}$$

$$1,1627 \text{ s} < 1,291 \text{ s} < 1,628 \text{ s}$$

Maka struktur V-EBF telah sesuai dengan persyaratan SNI 1726: 2019 Pasal 7.8.2.1

5) Kontrol Gaya Gempa Dasar

Dilakukan kontrol terhadap gaya dinamis struktur dengan tujuan agar gaya gempa yang bekerja sesuai dengan yang disyaratkan oleh SNI 1726:2019 pasal 7.8, dengan persamaan gaya geser dasar seismik (V) sesuai persamaan 2.

$$V = C_s \cdot W \quad (2)$$

Perhitungan koefisien respons seismik C_s adalah sebagai berikut:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{(R/I)} = \frac{0,644783}{(8/1)} = 0,0806$$

Untuk $T \leq T_L$, nilai C_s yang dihitung tidak perlu melebihi :

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T(R/I)} = \frac{0,564760}{1,291 (8/1)} = 0,0547$$

Untuk $T \geq T_L$, harus tidak kurang dari :

$$C_s = 0,044 \cdot S_{DS} \cdot I \geq 0,01$$

$$C_s = 0,044 \cdot 0,644783 \cdot 1 \geq 0,01$$

$$C_s = 0,0284 \geq 0,01$$

Maka diambil nilai $C_s = 0,0547$

Sehingga didapat nilai:

$$T = 1,291 \text{ detik}$$

$$C_s = 0,0547 \text{ (koefisien respons seismik)}$$

$$W = 51814,558 \text{ kN}$$

$$V_{statis \text{ arah } x} = C_s \cdot W_t = 2834,256 \text{ kN}$$

$$V_{statis \text{ arah } y} = C_s \cdot W_t = 2834,256 \text{ kN}$$

Berdasarkan SNI 1726:2019, nilai akhir respon dinamis struktur gedung dalam arah yang ditetapkan tidak boleh kurang dari 100% dari nilai respon statis. Nilai hasil analisis dinamik gaya geser gempa menggunakan SAP 2000 adalah sebagai berikut:

$$V_{dinamis \text{ arah } x} = 1707,729 \text{ kN} < V_{statis \text{ arah } x}$$

$$V_{dinamis \text{ arah } y} = 1716,686 \text{ kN} < V_{statis \text{ arah } y}$$

Dari hasil analisis di atas maka perlu dilakukan faktor perbesaran gempa sebesar:

$$\text{Gempa Arah X} = \frac{2834,256}{1707,729} = 1,660$$

$$\text{Gempa Arah Y} = \frac{2834,256}{1716,686} = 1,652$$

Sehingga nilai $V_{dinamis}$ menjadi:

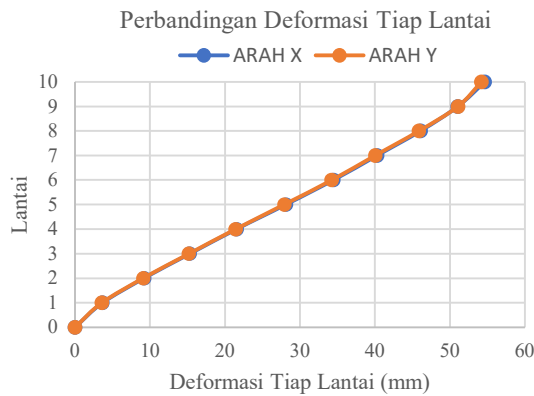
$$V_{dinamis \text{ arah } x} = 2834,83 \text{ kN} > 2834,256 \text{ kN}$$

$$V_{dinamis \text{ arah } y} = 2835,966 \text{ kN} > 2834,256 \text{ kN}$$

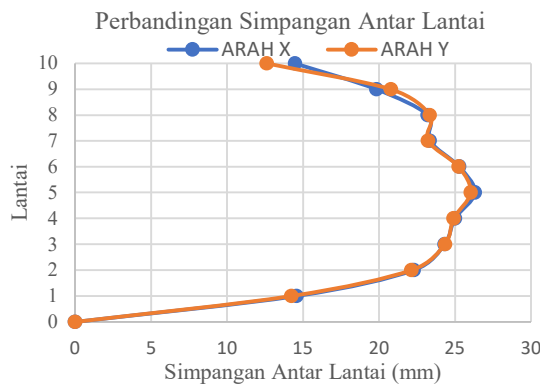
6) Kontrol Simpangan

Pemberian batasan pada Simpangan antar lantai dilakukan untuk keperluan kenyamanan penghuni struktur dan mencegah terjadinya kerusakan non struktural. Pada pasal 7.12 SNI 1726:2019, disebutkan bahwa Simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi Simpangan antar tingkat izin (Δ_a):

$$\Delta \leq \Delta_a \quad (3)$$



Gambar 8 Perbandingan deformasi antar lantai arah x dan y

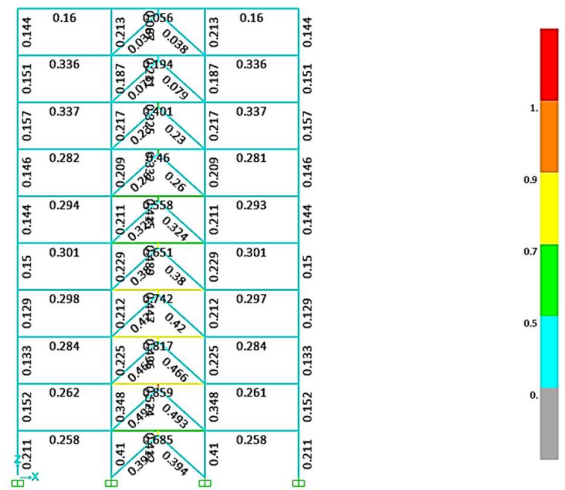


Gambar 9. Perbandingan simpangan antar lantai arah x dan y

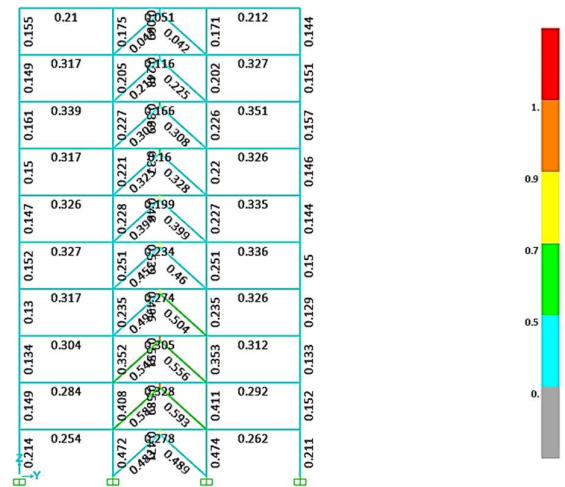
Gambar 8 dan Gambar 9 merupakan perbandingan nilai deformasi dan simpangan antar lantai masing-masing arah sumbu x dan sumbu y. Grafik menunjukkan bahwa nilai simpangan maksimal pada arah x = 26,32 mm dan simpangan maksimal arah y = 26,036 mm. Nilai simpangan antar lantai masing-masing arah x dan arah y dibawah nilai simpangan izin yaitu sebesar 80 mm, sehingga struktur memenuhi syarat dalam kontrol simpangan.

7) Steel Check Design (Kontrol Penampang)

Kontrol penampang dilakukan dengan menggunakan Steel Check Design pada software SAP2000, dengan tujuan untuk memastikan bahwa profil yang digunakan telah sesuai dengan persyaratan dan kuat dalam menahan beban struktur yang telah diberikan sesuai dengan SNI 1726:2019 dan SNI 1727:2018. Kontrol steel check design dilakukan dengan scale factor beban gempa yang telah dilakukan perbesaran pada kontrol gaya gempa dasar.



Gambar 10. Hasil steel check design sumbu X-Z

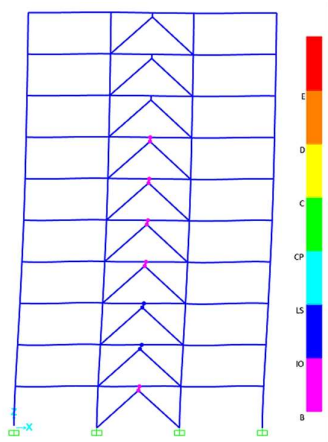


Gambar 11. Hasil steel check design sumbu Y-Z

Gambar 10 dan Gambar 11 merupakan hasil kontrol penampang dengan scale factor perbesaran gaya gempa. Indikator warna menunjukkan bahwa penampang masih dalam kondisi aman, yaitu dengan warna biru dan hijau, serta rasio terbesar pada sumbu X-Z sebesar 0,616 < 1,0 dan rasio terbesar pada sumbu Y-Z sebesar 0,608 < 1,0.

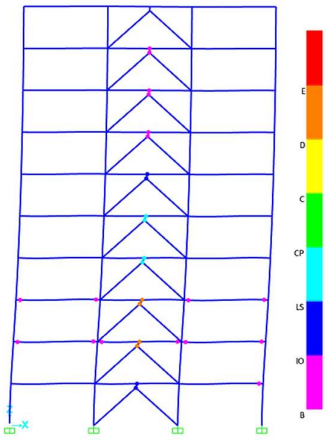
8) Kontrol Analisis Pushover

Tujuan dari dilakukannya analisis Pushover ini adalah untuk mengetahui perilaku struktur dan keruntuhan atau pelehan pada elemen-elemen struktur. Pada struktur jenis Eccentrically Braced Frames (EBF) elemen yang diharuskan mengalami pelehan terlebih dahulu adalah elemen link.



Gambar 12. Analisis *Pushover* Pelelehan Pertama pada Struktur V-EBF arah x

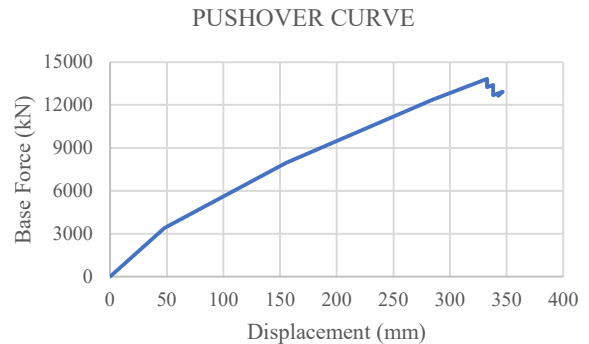
Hasil analisis *Pushover* arah x pada struktur *Eccentrically Braced Frames* (EBF) 10 lantai dengan jenis *link* vertikal, dari **Gambar 12** dapat dilihat bahwa pelelehan pertama terjadi pada elemen *link* pada lantai 1 hingga lantai 7 step ke 2, dengan nilai *displacement* kolom paling bawah pada *frame* dengan elemen yang mengalami pelelehan yaitu lantai 1 adalah sebesar 14,8 mm dan nilai *displacement* kolom paling atas pada *frame* dengan elemen yang mengalami pelelehan yaitu lantai 7 adalah sebesar 130,7 mm.



Gambar 13. Analisis *Pushover* kerusakan terakhir pada struktur EBF arah x

Pelelehan terakhir yaitu pada step ke-9. Seperti yang terlihat pada **Gambar 13**, terjadi pelelehan pada elemen *link* lantai 1 hingga lantai 9, serta pelelehan elemen balok pada lantai 1 hingga lantai 3 dengan nilai *displacement* kolom paling bawah pada *frame* dengan elemen yang mengalami pelelehan yaitu lantai 1 adalah sebesar 31,1 mm dan nilai *displacement* kolom paling atas pada *frame* dengan elemen yang mengalami pelelehan yaitu lantai 9 adalah sebesar 331,3 mm. Pelelehan yang terjadi pada struktur EBF yang telah

dilakukan analisis *Pushover* telah memenuhi syarat yaitu elemen *link* mengalami pelelehan terlebih dahulu.



Gambar 14. Grafik hasil analisis *Pushover* struktur V-EBF

Gambar 14 merupakan grafik hasil analisis *Pushover*, dapat diketahui bahwa struktur V-EBF mengalami pelelehan pada *displacement* lantai puncak sebesar 47,972 mm dengan *base force* sebesar 3.405,696 kN. Selanjutnya struktur V-EBF mencapai nilai *ultimate* pada *displacement* sebesar 332,748 mm dengan *base force* sebesar 13.832,371 kN. Sehingga dari hasil analisis dapat diketahui daktilitas dari struktur V-EBF adalah sebesar 6,936.

B. Analisis Pemodelan pada Abaqus CAE

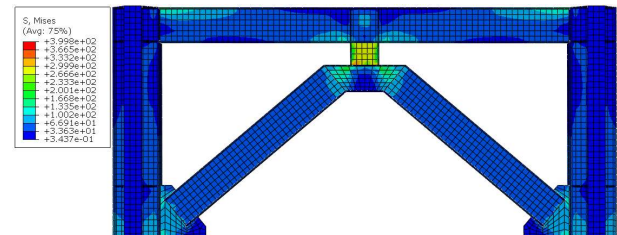
Pemodelan spesimen V-EBF-WF diambil dari dimensi hasil analisis struktur gedung 10 lantai V-EBF pada SAP 2000 dengan mengambil portal lantai 1-4 yang mengalami kegagalan terlebih dahulu pada analisis SAP 2000. Dimensi masing-masing elemen yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 8**.

Tabel 8 Dimensi Elemen V-EBF-WF pada Pemodelan Abaqus CAE

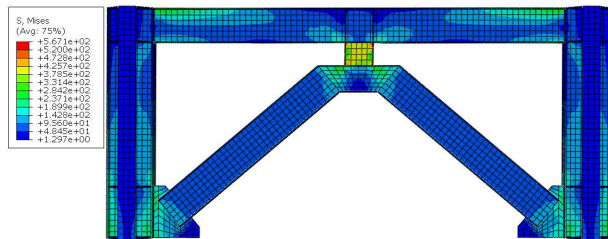
Elemen	Dimensi
Kolom	KC 800x300x14x26
Balok	WF 600x200x11x17
Link	WF 500x200x10x16
Bracing	WF 600x200x11x17

1) Hasil Analisis Spesimen V-EBF-WF

Pemodelan spesimen V-EBF-WF, menggunakan EBF dengan *link* vertikal dengan dimensi yang tercantum pada **Tabel 8**.

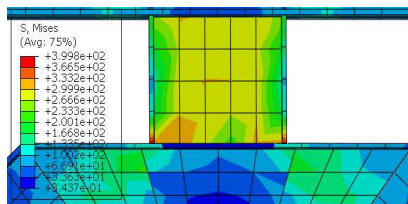


Gambar 15. Tegangan pada Spesimen Frame V-EBF-WF ketika Mencapai Nilai Leleh Pertama (f_y)

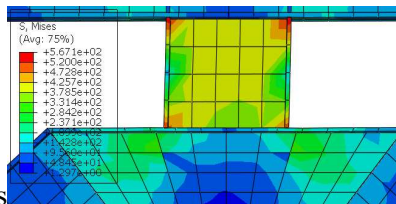


Gambar 16. Tegangan pada Spesimen Frame V-EBF-WF ketika Mencapai Nilai Ultimate (f_u)

Spesimen *frame* V-EBF-WF, elemen *link* pada *frame* mencapai tegangan leleh pertama dengan nilai maksimum 399,8 MPa dengan deformasi sebesar 5,252 mm atau setara dengan 0,00131 rad, dan menghasilkan gaya sebesar 1.266,57 kN. Elemen lain seperti balok, kolom, dan *bracing* belum mengalami pelelehan dengan tegangan maksimum sebesar 233,3 MPa seperti yang terlihat pada **Gambar 15**. Pada hasil analisis ini elemen *link* mengalami pelelehan dan mencapai kondisi plastis terlebih dahulu, untuk elemen lain seperti balok, kolom, dan *bracing* masih dalam kondisi elastis, sesuai dengan persyaratan untuk *Eccentrically Braced Frames* (EBF). Spesimen V-EBF-WF, elemen *link* pada *frame* mencapai tegangan *ultimate* dengan nilai maksimum 567,1 MPa dengan deformasi sebesar 14,67 mm atau setara dengan 0,00367 rad, dan menghasilkan gaya sebesar 2.419,96 kN. Elemen lain seperti balok, kolom, dan *bracing* belum mencapai nilai *ultimate* dengan tegangan maksimum sebesar 331,4 MPa seperti yang terlihat pada **Gambar 16**.



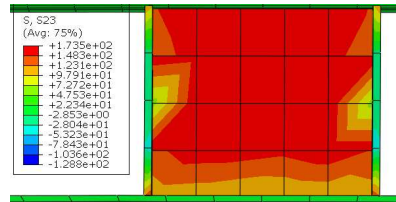
Gambar 17. Kegagalan *link* WF Saat Mencapai f_y



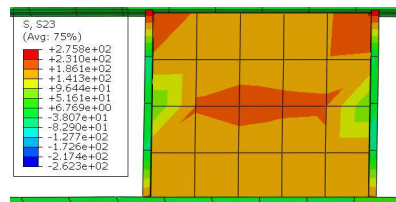
Gambar 18. Kegagalan *link* WF Saat Mencapai f_u

Gambar 17. menunjukkan kondisi kegagalan *link* WF ketika mencapai nilai tegangan leleh (f_y), *link* WF mengalami pelelehan yang terjadi pada area yang sama yaitu pada *web link* dan ujung *flange link*, dan tegangan tertinggi berada pada ujung *flange link*. Selanjutnya, *link* WF mencapai nilai *ultimate* pada area yang sama saat terjadi pelelehan, seperti yang

terlihat pada **Gambar 18**. Kegagalan spesimen V-EBF-WF telah memenuhi konsep struktur *Eccentrically Braced Frames* (EBF) dengan kegagalan terlebih dahulu terjadi pada *link*

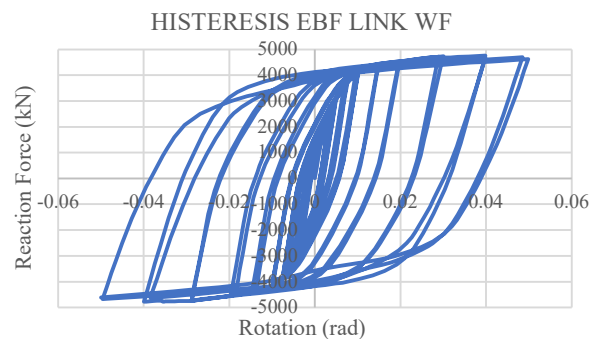


Gambar 19. Kegagalan *link* WF Ketika Mencapai Pelelehan Geser



Gambar 20. Kegagalan *link* WF Ketika Mencapai Ultimate Geser

Gambar 19 menunjukkan kondisi *link* WF ketika mencapai nilai pelelehan akibat geser, dimana pelelehan *link* akibat geser terjadi merata pada *web link*. Kemudian *link* WF mencapai nilai *ultimate* geser dengan kegagalan yang terjadi tetap pada *web link* dan ujung *flange link*, akan tetapi nilai tegangan tertinggi berada pada tengah *web link* dan ujung *flange link* bagian atas, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 20**. Kegagalan spesimen V-EBF-WF akibat geser telah memenuhi konsep struktur *Eccentrically Braced Frames* (EBF) dengan kegagalan geser terjadi pada *link*.



Gambar 21. Kurva Histeresis Spesimen V-EBF-WF

Kurva histeresis pada hasil analisis spesimen V-EBF-WF menunjukkan bahwa gaya maksimum yang diserap oleh spesimen adalah sebesar 4.782,61 kN pada kondisi *displacement* 159,805 mm atau setara dengan rotasi sebesar 0,0399 rad seperti yang terlihat pada **Gambar 21**. *Eccentrically Braced Frame* (EBF) dengan *link* WF ini dapat mendisipasi gaya geser sebesar 2.328,243 kN.m. Sehingga dari hasil analisis

dapat diketahui daktilitas dari spesimen frame V-EBF-WF adalah sebesar 7,143.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pemodelan struktur gedung 10 lantai dengan sistem *Eccentrically Braced Frames* (EBF) menggunakan 3 tipe dimensi berdasarkan ketinggian lantai, antara lain pada lantai 1-4 menggunakan kolom KC 800x300x14x26, balok dan *bracing* WF 600x200x11x17, *link* WF 500x200x10x16; pada lantai 5-7 menggunakan kolom KC 700x300x13x24, balok WF 600x200x11x17, *bracing* WF 500x200x10x16, *link* 450x200x9x14; serta pada lantai 8-10 menggunakan kolom KC 588x300x12x20, balok 500x200x10x16, *bracing* 450x200x9x14, dan *link* 400x200x8x13.
2. Hasil analisis linier menggunakan SAP 2000 menunjukkan struktur memenuhi syarat dalam kontrol partisipasi massa, periode, gaya gempa dasar, simpangan, dan *steel check design*. Hasil analisis non linier *Pushover*, elemen yang mengalami kegagalan terlebih dahulu adalah elemen link, sehingga struktur sesuai dengan konsep *Eccentrically Braced Frames* (EBF).
3. Hasil analisis *Pushover*, dapat diketahui bahwa struktur V-EBF mengalami pelelehan pada *displacement* lantai puncak sebesar 47,972 mm dengan *base force* sebesar 3.405,696 kN. Selanjutnya struktur V-EBF mencapai nilai *ultimate* pada *displacement* sebesar 332,748 mm dengan *base force* sebesar 13.832,371 kN. Sehingga dari hasil analisis dapat diketahui daktilitas dari struktur V-EBF adalah sebesar 6,936.
4. Pemodelan dan analisis portal 1 lantai dengan Abaqus CAE spesimen V-EBF-WF menggunakan dimensi yang sebelumnya dianalisis pada SAP 2000 yaitu kolom KC 800x300x14x26, balok dan *bracing* WF 600x200x11x17, serta *link* WF 500x200x10x16, menghasilkan performa kapasitas geser maksimum sebesar 4.782,61 kN pada rotasi sebesar 0,0399 rad, mampu mendisipasi energi sebesar 2.328,243 kN.m, serta mempunyai nilai daktilitas sebesar 7,143. Elemen yang mengalami kegagalan terlebih dahulu adalah elemen link, sehingga struktur sesuai dengan konsep *Eccentrically Braced Frames* (EBF).

Daftar Pustaka

- [1] M. Bruneau, *Ductile Design of Steel Structures*, New York: Mc Graw Hill, 2011.
- [2] B. Suswanto, J. Rafael and W. Sutrisno, *Sistem Struktur Eccentrically Braced Frames*, Surabaya, 2018.
- [3] M. Musmar, "Effect of Link on Eccentrically Braced Frames," *Journal of Engineering Sciences*, Vols. 40, 1 (1), pp. 35-43, 2012.
- [4] N. Mansour, C. Christopolous and R. Tremblay, "Experimental Validation of Replaceable Shear Links for Eccentrically Braced Steel Frames," *Journal of Structural Engineering*, vol. 137, pp. 1141-1152, 2011.
- [5] F. Wang, "Cyclic Behaviour of Y-Shaped Eccentrically Braced Frames Fabricated with High-Strength Steel Composite," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 120, pp. 176-187, 2016.
- [6] M. Shayanfar, A. Rezaeuan and Z. A, "Seismic Performance of Eccentrically Braced Frames with Vertical Link Using PBPD Method," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2012.
- [7] B. Suswanto, A. A.R. and E. Wahyuni, "Numerical Behavior Study of Short Link, Intermediate Link, and Long Link in Eccentrically Braced Frames Steel Structure," *International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562*, vol. 12, pp. 11460-11471, 2017.
- [8] AISC341, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago: AISC, 2016.
- [9] SNI1727-2018, *Beban Minimum untuk Perencanaan Gedung dan Struktur Lain*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2018.
- [10] SNI1726-2019, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [11] R. Montouri, E. Nastri and V. Pilusi, "Theory of Plastic Mechanism Control for Eccentrically Braced Frames with Inverted Y-Scheme," *Journal of Constructional Steel Research* 92, pp. 122-135, 2014.
- [12] J. Bathe, *Finite Element Procedures*, United States of America: Prentice Hall, 2012.
- [13] SNI1729-2015, *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2015.