

## Studi Numerik Pengaruh Variasi *Coupling Beam* Pada Sistem *Coupled Steel Plate Shear Wall* (CSPSW)

Rendy Moneta<sup>1,\*</sup> Budi Suswanto<sup>1</sup>

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [monetarendy1@gmail.com](mailto:monetarendy1@gmail.com)

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	17 Januari 2024	<p><i>This study aims to investigate the influence of coupling beam (CB) variations on the performance of the Coupled Steel Plate Shear Wall (CSPSW) structural system using the finite element method approach with Abaqus. Understanding how different variations of CSPSW, distinguished by the length and cross-sectional area of the coupling beam (CB), may affect the CSPSW system's behavior in resisting lateral forces due to earthquakes is essential. Four CSPSW models were developed in this research, distinguished based on intermediate coupling beam (CSPSW-I) and long coupling beam (CSPSW-L). The analysis results of the CSPSW system models include hysteresis curves, deformation patterns, energy dissipation capacity, and shear force capacity. The conclusion drawn from the analysis is that intermediate coupling beams (CSPSW1-I and CSPSW2-I) are more effective compared to long coupling beams (CSPSW1-L and CSPSW2-L).</i></p>
Diperbaiki	12 Februari 2024	
Disetujui	27 Februari 2024	

*Keywords: energy dissipation, steel plate shear walls, coupling beam, dynamic response, steel frame structures.*

Kata kunci: disipasi energi, dinding geser pelat baja, balok kopling, respon dinamik, struktur rangka baja.

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi *coupling beam* (CB) pada kinerja sistem struktur *Coupled Steel Plate Shear Wall* (CSPSW) melalui pendekatan metode elemen hingga menggunakan Abaqus. Kebutuhan memahami perilaku variasi CSPSW yang dibedakan berdasarkan panjang dan besarnya penampang *coupling beam* (CB) dapat mempengaruhi perilaku sistem CSPSW dalam menahan gaya lateral akibat gempa. Penelitian ini membuat 4 model CSPSW yang dibedakan berdasarkan *intermediate coupling beam* (CSPSW-I) dan *long coupling beam* (CSPSW-L). Hasil analisa sistem model CSPSW yaitu berupa kurva histeresis, pola deformasi, kapasitas disipasi energi dan kapasitas gaya geser. Kesimpulan hasil analisis yaitu *intermediate coupling beam* (CSPSW1-I dan CSPSW2-I) lebih efektif dibandingkan dengan *long coupling beam* (CSPSW1-L dan CSPSW2-L).

### 1. Pendahuluan

Dalam memenuhi kebutuhan sistem struktural yang semakin kompleks, pengembangan inovasi di bidang desain dan konstruksi bangunan menjadi esensial. Salah satu solusi yang dapat meningkatkan kinerja struktural adalah pemanfaatan sistem struktur *Coupled Steel Plate Shear Wall* (CSPSW). Sistem CSPSW terdiri dari dua dinding geser pelat baja (*Steel Plate Shear Wall*) yang terhubung oleh *Coupling Beam* (CB), menciptakan integrasi kekakuan dan daya dukung yang optimal [1]. Sebagai respons terhadap beban dinamik, khususnya gempa bumi, CSPSW dapat meningkatkan kapasitas disipasi energi pada bangunan yang direncanakan [2]. Namun, dampak dari variasi *coupling beam* terhadap performa sistem CSPSW masih memerlukan pemahaman yang lebih mendalam.

Variasi panjang *coupling beam* dalam sistem CSPSW dapat menghasilkan pengaruh yang signifikan pada perilaku dan respons keseluruhan struktur [3]. Panjang *coupling beam* memengaruhi distribusi beban antara dinding geser pelat baja, serta kekakuan dan elastisitas sistem. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai bagaimana variasi panjang

*coupling beam* mempengaruhi kinerja dan kemampuan sistem struktural dalam upaya untuk mengoptimalkan desain struktur [4].

Disipasi energi merupakan aspek kritis dalam kinerja struktur, terutama dalam menahan beban dinamik seperti gempa bumi. Panjang *coupling beam* dapat mempengaruhi tingkat disipasi energi yang dapat dicapai oleh sistem CSPSW. *Coupling beam* dengan panjang yang efektif mampu meredam dan menyerap energi deformasi yang terjadi selama peristiwa gempa, mengurangi potensi kerusakan struktural yang lebih lanjut [5].

Tingkat daktilitas adalah karakteristik penting dalam perancangan struktur yang aman dan dapat memberikan peringatan sebelum terjadi kegagalan yang tidak terkontrol. Variasi panjang *coupling beam* dapat mempengaruhi tingkat daktilitas sistem CSPSW. Dengan mengoptimalkan panjang *coupling beam*, sistem struktur CSPSW dapat memberikan kemampuan lebih besar dalam merespons deformasi yang terjadi selama beban dinamik atau beban gempa, sehingga mengurangi risiko kerusakan mendalam pada struktur bangunan [2].

Dalam menganalisis dampak variasi *coupling beam* terhadap kinerja sistem CSPSW secara lebih rinci, pendekatan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Abaqus merupakan metode yang kuat dan efektif. Abaqus menyediakan fitur numerik yang canggih untuk menganalisis respons struktural dalam berbagai skenario beban dan kondisi lingkungan. Dengan memanfaatkan program bantu Abaqus, penelitian ini bertujuan untuk merinci pengaruh variasi *coupling beam* terhadap disipasi energi, nilai gaya geser, dan deformasi *out of plane* sistem CSPSW dalam menghadapi gempa bumi atau beban dinamik lainnya [6].

Secara keseluruhan, penelitian mengenai "Studi Numerik Pengaruh Variasi *Coupling Beam* pada Sistem *Coupled Steel Plate Shear Wall*" memiliki relevansi yang tinggi dalam upaya memahami interaksi kompleks antara panjang *coupling beam* dan performa keseluruhan sistem CSPSW [7]. Diharapkan bahwa hasil penelitian ini dapat memberikan wawasan yang berharga dalam merancang struktur yang kuat dan efisien dalam menghadapi beban dinamik, serta berkontribusi pada pengembangan teknologi konstruksi yang lebih aman dan efektif.

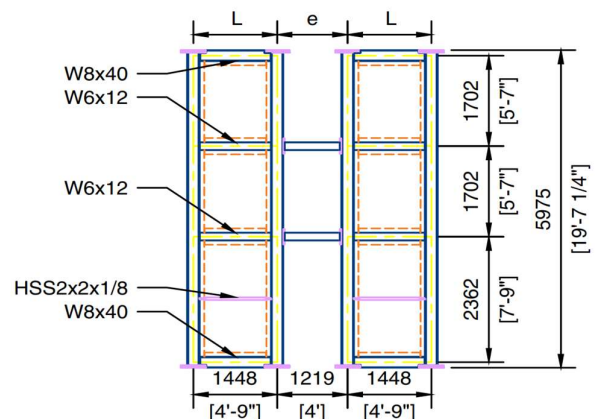
Penelitian CSPSW ini fokus pada modifikasi model CSPSW dengan variasi *section* dan panjang *coupling beam*. Metode yang digunakan yaitu *finite element method* (FEM) dengan menggunakan program bantu Abaqus CAE 2021 untuk validasi model, serta dilakukan pengaplikasian CSPSW dengan *coupling beam* pada perencanaan Gedung 15 Lantai dengan program bantu Etabs.

## 2. Metode

Pada penelitian ini dilakukan dua metode analisis yaitu dengan menggunakan metode elemen hingga *finite element method* (FEM) dengan program bantu Abaqus 2021 dan metode analisis respon spektrum untuk Gedung 15 lantai menggunakan program bantu Etabs. Analisis elemen hingga digunakan untuk validasi model CSPSW FLEX [5], sedangkan analisis respon spektrum menggunakan program bantu Etabs digunakan untuk pengecekan model CSPSW ketika diterapkan pada gedung 15 lantai.

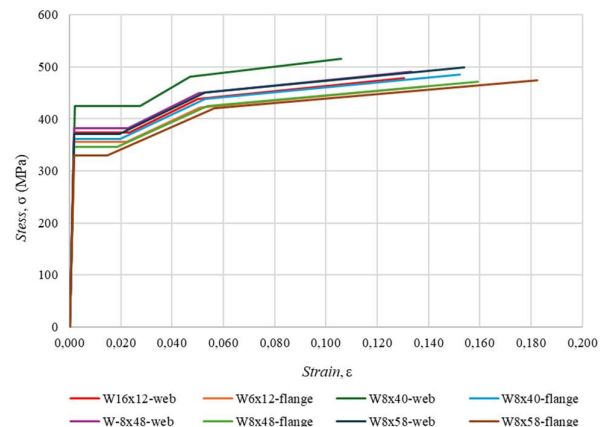
### A. Validasi menggunakan Program Bantu Abaqus CAE 2021

Validasi model dilakukan pada spesimen CSPSW-FLEX dari penelitian Daniel & Larry (2017) [5]. Spesimen CSPSW-FLEX merupakan model *coupled steel plate shear wall* (CSPSW) yang tidak menggunakan penambahan *stiffener* [5]. Model validasi numerik dilakukan dengan membuat pemodelan spesimen CSPSW-FLEX dengan menggunakan program bantu Abaqus 2021 sesuai pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Model CSPSW-FLEX [5]

Pada **Gambar 1**, profil untuk VBE menggunakan W8x58, HBE dan CB menggunakan W6x12, sedangkan pelat pengisi CSPSW menggunakan pelat baja dengan ketebalan 1,16 mm. Mutu profil yang digunakan dalam model validasi sesuai dengan penelitian Daniel dan Larry, [5] seperti pada **Tabel 1**. Kurva stress-strain mutu profil pada model validasi seperti pada **Gambar 2**.



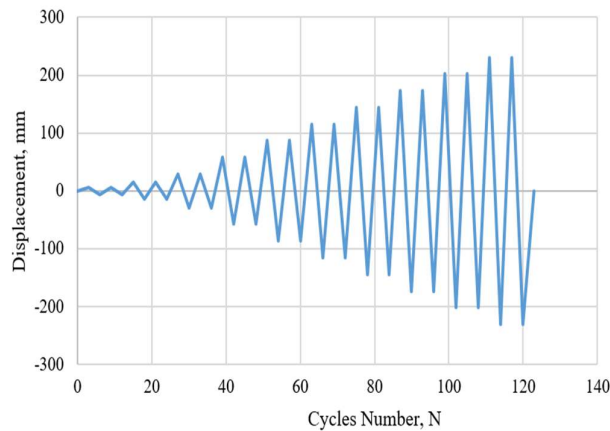
**Gambar 2.** Grafik *Stress-Strain* CSPSW-FLEX [5]

Analisis yang dilakukan menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dan menggunakan prosedur analisis statis non-linear berupa 3D *Shell* pada Abaqus [8]. Salah satu tujuan utama dari analisis ini adalah untuk memperoleh dan menganalisis nilai kurva histeresis *load-displacement* dan dibandingkan antara hasil Daniel dan Larry dengan hasil pemodelan numerik [5].

Pembebanan pada model dilakukan dengan metode *displacement control* menggunakan beban dengan mengontrol drift 0,1% (dua siklus), 0,25% (dua siklus), dan 0,5% (dua siklus), dan ditingkatkan sebesar 0,5% hingga mencapai 4,0%, grafik pembebanan siklik disajikan pada **Gambar 3**.

**Tabel 1.** Mutu Material CSPSW-FLEX [6]

Shape	Yield stress [MPa (ksi)]			Ultimate stress [MPa (ksi)]		
	Web	Flange	Average	Web	Flange	Average
W6 × 12	374 (54,2)	356 (51,7)	362 (52,5)	478 (69,3)	462 (67)	467 (67,7)
W6 × 25	—	354 (51,3)	354 (51,3)	—	479 (69,5)	479 (69,5)
W8 × 40	425 (61,7)	362 (52,4)	393 (57,1)	516 (74,8)	485 (70,4)	501 (72,6)
W8 × 48	382 (55,4)	346 (50,2)	358 (51,9)	491 (71,2)	471 (68,3)	477 (69,2)
W8 × 58	371 (53,8)	330 (47,8)	347 (50,4)	499 (72,4)	474 (68,8)	485 (70,4)
Web plate	—	—	189 (27,4)	—	—	330 (47,9)



**Gambar 3.** Pembebanan Siklik pada Abaqus [6]

**B. Pengaplikasian CSPSW pada Gedung 15 Lantai dengan menggunakan Program Bantu Etabs**

Pada awal pemodelan digunakan metode analisis menggunakan respons spektrum dengan pemodelan Gedung 15 Lantai pada program bantu Etabs. Material yang digunakan untuk elemen VBE yaitu BJ 55, elemen HBE yaitu BJ 41, dan *infill plate* yaitu BJ 34, dengan lebar bangunan 30 m, dan panjang bangunan 23 m, tebal pelat pengisi 4 mm, lebar CSPSW 11 m dan tinggi CSPSW 4 m, ilustrasi model CSPSW dapat dilihat pada **Gambar 5**. **Tabel 2** merupakan profil yang digunakan untuk analisis gedung 15 lantai.

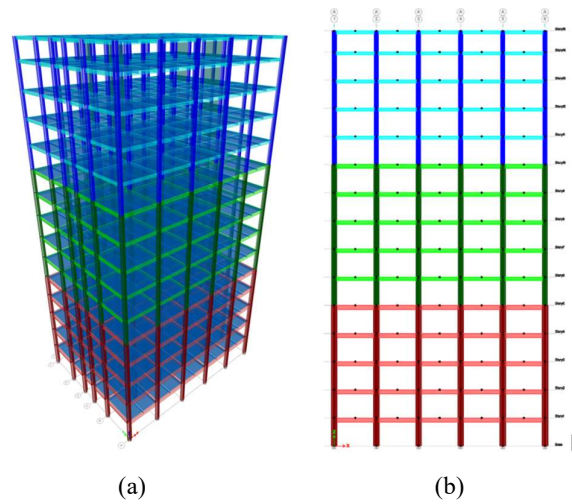
Pada program bantu Etabs, pemodelan frame dilakukan dengan cara penginputan material pada *Define > Material > Add New Material > Material Property Data*. Kemudian setelah input material selesai tahapan selanjutnya yaitu define penampang yang digunakan pada *Define > Section Properties > Frame Properties > Add New Property*, untuk penampang *Wide Flange* dan *King Cross*. Setelah itu dilakukan penggambaran 3D model bangunan gedung 15 lantai dengan menggunakan program bantu Etabs 20 seperti pada **Gambar 4**.

Pembebanan pada gedung 15 lantai diimplementasikan pada setiap lantai meliputi beban hidup, beban mati tambahan

dan beban gempa yang berupa respons spektrum. Pembebanan lantai yang digunakan mengikuti **Tabel 3**.

**Tabel 2.** Profil yang digunakan pada Etabs

Lantai	Kolom	Balok Arah Vertikal	Balok Arah Horizontal
1 - 5	KC	IWF	IWF
	800.300.14.26	600.300.12.20	600.300.12.20
6 - 10	KC	IWF	IWF
	700.300.13.24	500.200.10.16	500.200.10.16
11 - 15	KC	IWF	IWF
	600.300.12.20	400.200.8.13	400.200.8.13

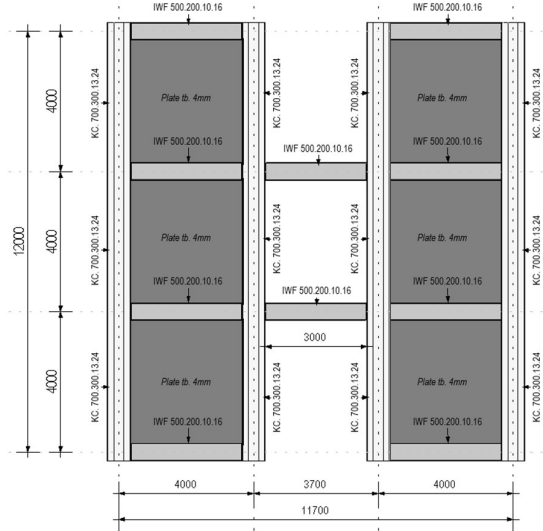


**Gambar 4.** Pemodelan Gedung 15 Lantai menggunakan program bantu Etabs (a) 3D View, (b) section view.

Pada gedung ini diasumsikan digunakan sebagai apartemen yang berada di Kota Surabaya. Pada SNI 1726:2019 Tabel 3 [9] untuk kategori resiko gedung hunian yaitu II, dengan nilai  $I_e = 1,0$ . Parameter gempa diambil dengan menggunakan program bantu Peta Gempa dan Respons Spektra 2021 [10], sehingga didapatkan grafik respon spektrum seperti pada **Gambar 6**.

Kontrol pemodelan Etabs dilakukan untuk pengecekan model bangunan sesuai dengan batasan yang diisyaratkan SNI 1726:2019 [9] terkait beban gempa yang diterapkan.

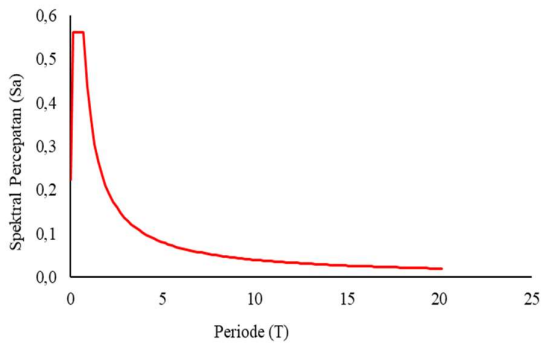
Pengecekan model bangunan meliputi kontrol partisipasi massa, kontrol waktu getar alami fundamental, kontrol gaya dasar dinamis struktur, kontrol simpangan dan kontrol penampang.



Gambar 5. Ilustrasi Pemodelan CSPSW pada Etabs

Tabel 3. Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup

No	Beban	Kg/m <sup>2</sup>	Lantai
1	Beban mati tambahan	135,5	2-14
	pelat lantai		
2	Beban mati tambahan	35,5	15
	pelat atap		
3	Beban hidup pelat lantai	192	2-14
4	Beban hidup pelat atap	97	15



Gambar 6. Respon Spektrum

Kontrol terhadap partisipasi massa pada pemodelan struktur untuk perhitungan respon dinamik struktur harus sekurang-kurangnya 90% untuk arah x maupun arah y struktur, sesuai dengan SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.1 [9]. Kontrol waktu getar alami fundamental struktur untuk mencegah bangunan mengalami getar terlalu besar. Berdasarkan SNI 1726:2019 [9] didapatkan batasan periode

minimum seperti pada persamaan (1) dan batasan periode maksimum seperti pada persamaan (2).

$$T_a = C_t \times h_n^x \tag{1}$$

dimana:

- T<sub>a</sub> = Periode fundamental struktur, s
- H<sub>n</sub> = Ketinggian total struktur, m
- C<sub>t</sub> = Parameter pendekatan (SNI 1726:2019 Tabel 18)
- x = Parameter pendekatan (SNI 1726:2019 Tabel 18)

$$T = C_a \times C_u \tag{2}$$

dimana:

- C<sub>u</sub> = koefisien (SNI 1726:2019 Tabel 17)

Kontrol terhadap gaya geser dasar yang dialami struktur pada arah x dan y ditetapkan tidak boleh kurang dari 100% dari nilai gaya geser statik yang didapatkan dari berat struktur, dimana nilai gaya geser (V) dihitung melalui metode statik ekuivalen seperti pada persamaan (3).

$$V = C_s \times W \tag{3}$$

dimana:

- V = Gaya geser statis, kg
- C<sub>s</sub> = Koefisien respons seismik
- W = Berat seismik, kg

Kontrol simpangan antar lantai didasarkan SNI 1726:2019 pasal 7.8.6, pembatasan simpangan antar lantai ini bertujuan untuk mencegah kerusakan non-struktural dan ketidaknyamanan penghuni. Dengan perhitungan nilai simpangan seperti pada persamaan (4).

$$\delta_x = \frac{C_d \times \delta_{xe1}}{I_e} \tag{4}$$

dimana:

- δ<sub>x</sub> = Simpangan lantai
- δ<sub>xe1</sub> = Simpangan yang dihitung akibat beban gempa tingkat 1
- C<sub>d</sub> = faktor pembesaran defleksi (SNI 1726:2019 Tabel 12)
- I<sub>e</sub> = faktor keutamaan gedung (SNI 1726:2019 Tabel 4)

Tahapan kontrol selanjutnya yaitu kontrol terhadap penampang. Kontrol penampang dilakukan dengan *steel check design* pada pemodelan gedung mengacu AISI 360-16 [11], *steel check design* dengan menggunakan program bantu Etabs bertujuan untuk mengetahui kapasitas penampang kolom, balok, dan CSPSW yang digunakan, dengan batasan rasio tidak boleh melebihi 1,00.

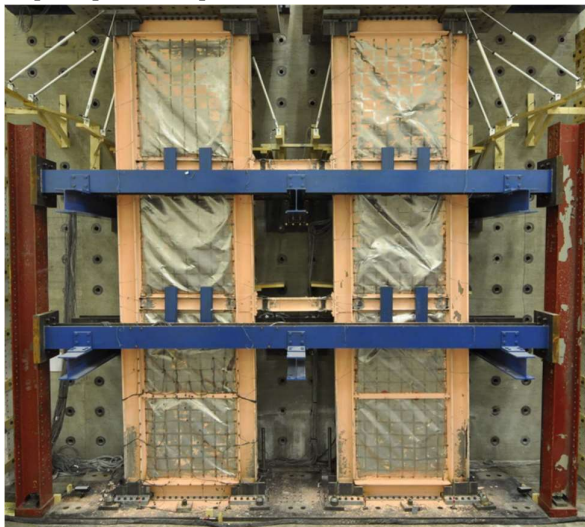


### 3. Hasil dan Pembahasan

#### A. Validasi Model C PSPW-FLEX

Validasi pada spesimen C PSPW-FLEX yang dimodelkan pada program bantu Abaqus CAE 2021 ditinjau dari hasil grafik histeresis, gaya geser maksimal, serta deformasi yang dihasilkan. Parameter tersebut digunakan sebagai pembandingan analisis hasil dari eksperimental Daniel dan Larry [5].

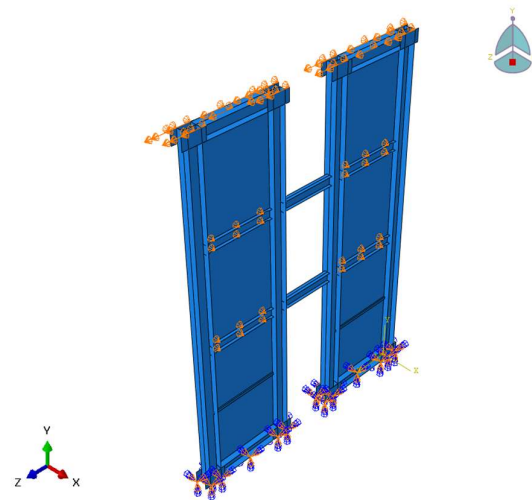
Hasil visualisasi geometri 3D Model menggunakan program bantu Abaqus CAE dapat dilihat pada **Gambar 8**, serta pada **Gambar 7** merupakan spesimen C PSPW-FLEX dari Daniel dan Larry [5], hasil akhir analisa menggunakan program bantu Abaqus dapat dilihat pada **Gambar 9**. Pada **Tabel 4** hasil eksperimental Daniel dan Larry C PSPW-FLEX didapatkan hasil gaya geser maksimum saat drift mencapai 4% dengan simpangan 57,66 mm, gaya geser yang didapatkan yaitu sebesar 760 kN. Hasil eksperimental Daniel dan Larry dapat dilihat pada **Gambar 10** dan hasil komparasi antara model eksperimental dengan 3D Model menggunakan abaqus dapat dilihat pada **Gambar 11**.



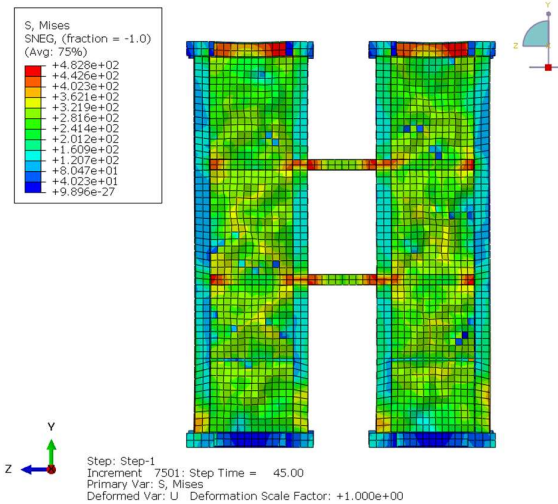
**Gambar 7.** Spesimen C PSPW-FLEX eksperimental Daniel dan Larry [5].

**Tabel 4.** Hasil perbandingan Drift Rasio dan Nilai Gaya Geser

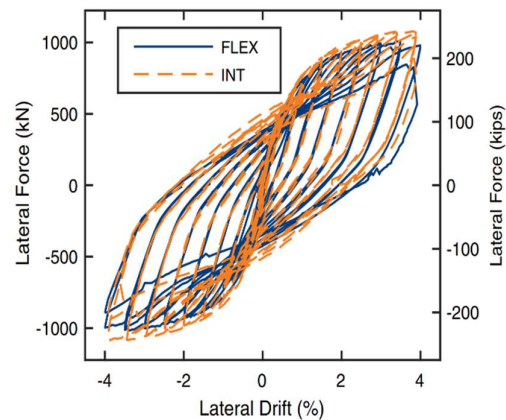
Spesimen	Drift (%)	Simpangan (mm)	Gaya Geser Maksimum (kN)
C PSPW Daniel & Larry	3,91	233,6225	1074
C PSPW Model Abaqus	3,8	227,939	1065,95



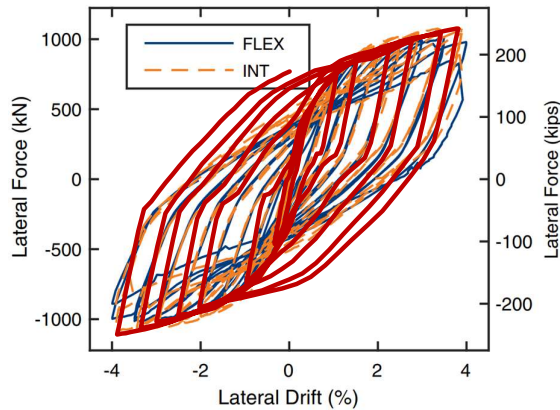
**Gambar 8.** Hasil 3D Model C PSPW-FLEX Abaqus



**Gambar 9.** Hasil akhir running 3D Model C PSPW-FLEX Abaqus



**Gambar 10.** Kurva Histeresis C PSPW-FLEX eksperimental Daniel dan Larry [5].



**Gambar 11.** Gabungan Kurva Histeresis Eksperimental Daniel dan Pemodelan Abaqus

**B. Pemodelan CSPSW pada Gedung 15 Lantai**

Pada pemodelan gedung 15 lantai dengan menggunakan sistem CSPSW yang diletakkan pada *core* bangunan menggunakan program bantu Etabs, dilakukan beberapa kontrol pada pemodelan, meliputi kontrol partisipasi massa, kontrol periode fundamental struktur, kontrol gaya dasar dinamis struktur, kontrol simpangan antar lantai dan analisis kontrol penampang. Berikut rincian pembahasan terkait kontrol terhadap model:

1) Kontrol Partisipasi Massa

Berdasar SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.1 [9] hasil analisis didapatkan partisipasi masa ragam terkombinasi paling sedikit 90% dari massa aktual dalam masing-masing arah. Dari hasil analisis menggunakan program bantu Etabs, didapatkan partisipasi massa arah X: 99,72 % dan partisipasi massa arah Y: 98,84 % seperti pada **Tabel 5**, maka dapat disimpulkan analisis struktur telah memenuhi syarat partisipasi massa ragam paling sedikit 90%.

**Tabel 5.** Partisipasi Massa

Case	ItemType	Item	Static %	Dynamic %
Modal	Acceleration	UX	100	99.72
Modal	Acceleration	UY	100	98.84
Modal	Acceleration	UZ	0	0

2) Kontrol Periode Fundamental Struktur

Untuk mendapatkan struktur yang kaku, nilai waktu getar alami ( $T$ ) dari struktur harus dibatasi sesuai SNI 1726:2019 [9]. Berdasarkan persamaan 1 didapatkan perioda minimum ( $T_a = C_t \times h_n^x$ ), dengan nilai parameter periode pendekatan  $C_t = 0,0488$  dan  $x = 0,75$  pada Tabel 18 SNI 1726:2019 [9].

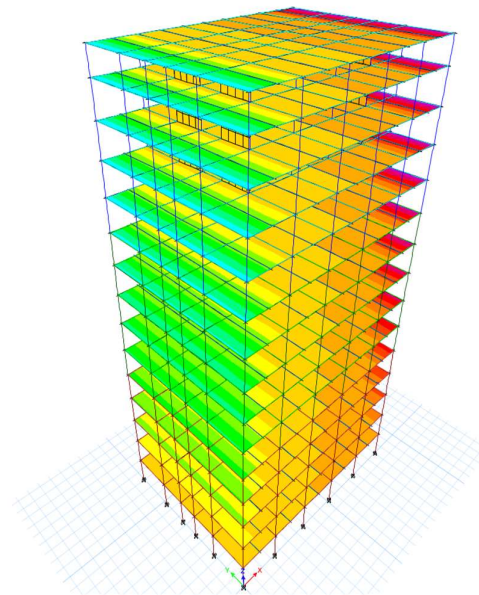
$$T_a = C_t \times h_n^x = 0,0724 \text{ s}$$

Untuk nilai periode maksimum tersebut dikali faktor  $C_u$ . Periode maksimum menentukan batas atas periode yang dihitung, harus ditinjau parameter percepatan *respons spektral design* pada 1 detik ( $S_{D1} > 0,4$ ) sehingga untuk  $C_u$  diambil 1,4. Nilai  $T$  dihitung dengan menggunakan persamaan 2.

$$T = T_a \times C_u = 2,681 \text{ s}$$

Pada analisis menggunakan program bantu Etabs, periode yang didapatkan pada modal 1 yaitu 2,212 s tertera pada **Gambar 12**, sehingga periode tersebut kurang dari periode maksimum dan masih memenuhi syarat.

3-D View Mode Shape (Modal) - Mode 1 - Period 2.212405042051



**Gambar 12.** Periode (T) pada Modal 1

3) Kontrol Gaya Dasar Dinamis Struktur

SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.4.1 menjelaskan apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam ( $V_i$ ) kurang dari 100% dari gaya geser ( $V$ ) yang dihitung melalui metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan  $V/V_i$ .

**Tabel 6.** Gaya geser akibat gempa x dan y

Case Type	Step Type	Step Number	FX kN	FY kN	FZ kN	MX kN-m	MY kN-m	MZ kN-m
LinStatic	Step By Step	1	-2538.1941	0	0	-108177.3051	29189.2323	
LinStatic	Step By Step	2	-2538.1941	0	0	-108177.3051	29189.2323	
LinStatic	Step By Step	3	-2538.1941	0	0	-108177.3051	29189.2323	
LinStatic	Step By Step	1	0	-3509.0581	0	144895.0605	0	-52635.8722
LinStatic	Step By Step	2	0	-3509.0581	0	144895.0605	0	-52635.8722
LinStatic	Step By Step	3	0	-3509.0581	0	144895.0605	0	-52635.8722
LinRespSpec	Max		1425.6129	0.0002	0	0.0004	49022.4883	16394.5488
LinRespSpec	Max		0.0001	1895.5097	0	66226.1119	0.0002	28432.6452

Kontrol gaya geser:

Gempa arah x

$$V_{dinamik} \geq 100\% V_{statik}$$

$$1425,61 \leq 2538,19 \quad (\text{Not OK})$$

Gempa arah y

$$V_{dinamik} \geq 100\% V_{statik}$$

$$1895,51 \leq 3509,06 \quad (\text{Not OK})$$

Dari kontrol diatas berdasarkan **Tabel 6**, bangunan belum memenuhi syarat nilai akhir respon. Pada Pasal 7.9.4.2 SNI 1726:2019 [9] dijelaskan apabila gaya geser dasar hasil analisis kurang dari 100%, maka harus diperbesar dengan faktor skala  $V_{statik}/V_{dinamik}$ .

Arah x

$$\frac{V_{statik}}{V_{dinamik}} = \frac{2538,19}{1425,61} = 1,78$$

Arah y

$$\frac{V_{statik}}{V_{dinamik}} = \frac{3509,06}{1895,51} = 1,85$$

Setelah perhitungan faktor skala kemudian dikalikan gaya geser struktur diperbesar dengan mengkalikan antara gaya geser awal dengan faktor skala, sehingga nilai gaya geser akan bertambah besar dan sudah memenuhi syarat pada Pasal 7.9.4.2 SNI 1726:2019 [9], setelah itu dapat dimunculkan tabel *base reactions* pada etabs, kemudian didapatkan gaya geser seperti pada **Tabel 7**.

**Tabel 7.** Gaya geser akibat gempa x dan y setelah pembesaran

Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	FX kN	FY kN	FZ kN	MX kN-m	MY kN-m	MZ kN-m
Static Ex	LinStatic	Step By Step	1	-2538.1941	0	0	0	-109177.3051	29189.2323
Static Ex	LinStatic	Step By Step	2	-2538.1941	0	0	0	-109177.3051	29189.2323
Static Ex	LinStatic	Step By Step	3	-2538.1941	0	0	0	-109177.3051	29189.2323
Static Ey	LinStatic	Step By Step	1	0	-3509.0581	0	144895.0605	0	-52635.8722
Static Ey	LinStatic	Step By Step	2	0	-3509.0581	0	144895.0605	0	-52635.8722
Static Ey	LinStatic	Step By Step	3	0	-3509.0581	0	144895.0605	0	-52635.8722
Spec x	LinRespSpec	Max		2539.9405	0.0002	0	0.0007	87340.8284	29209.3177
Spec y	LinRespSpec	Max		0.0002	3508.2581	0	122872.9909	0.0003	52623.8768

Kontrol gaya geser:

Gempa arah x

$$V_{dinamik} \geq 100\% V_{statik}$$

$$2539,94 \leq 2538,19 \quad (\text{OK})$$

Gempa arah y

$$V_{dinamik} \geq 100\% V_{statik}$$

$$3508,26 \leq 3509,06 \quad (\text{OK})$$

Dari kontrol gaya geser dengan menggunakan pemodelan menggunakan program bantu Etabs 20, dapat disimpulkan bahwa analisa gaya geser struktur gedung baja bertingkat 15 lantai sudah memenuhi persyaratan pada SNI 1726:2019 Pasal 7.8 [9]. Sehingga dapat dilanjutkan pada kontrol simpangan antar lantai.

4) Kontrol Simpangan Antar Lantai

Pembatasan simpangan antar lantai suatu struktur bertujuan untuk mencegah kerusakan non-struktur dan ketidaknyamanan penghuni bangunan. Simpangan yang terjadi dari hasil dinamis harus lebih kecil dari simpangan hasil analisis. Batas simpangan antar lantai dihitung menggunakan persamaan 4.

Batasan ijin simpangan lantai diatur pada Tabel 16 SNI 1726:2019 [9]. Sehingga hasil analisa menggunakan program bantu Etabs simpangan antar lantai untuk gempa arah x dan y seperti pada **Tabel 8** didapatkan nilai dibawah simpangan ijin, sehingga sudah memenuhi syarat OK.

Pada **Gambar 13** merupakan grafik hasil perpindahan lateral yang dialami Gedung CSPSW, dengan perpindahan arah X lebih besar dibandingkan dengan arah Y, dikarenakan panjang bangunan pada arah X lebih pendek dibandingkan dengan arah Y, namun perpindahan pada arah X dan Y masih dibawah simpangan ijin.

5) Analisis Kontrol Penampang

Pada analisis menggunakan program bantu Etabs *steel check design* dapat dilihat pada **Gambar 14**, *steel check design* diperlukan untuk mengetahui dan memastikan penampang yang digunakan untuk membuat model CSPSW modifikasi telah sesuai dengan persyaratan. Persyaratan yang digunakan pada Etabs yaitu AISC 360-16 [11].

Dari hasil *steel check design* pada **Gambar 14** yang menggunakan persyaratan AISC 360-16 [11] dengan kombinasi beban envelope, untuk elemen balok dan kolom memiliki rasio yang tidak melebihi 0,8, sehingga aman dan dapat digunakan sebagai profil struktur gedung 15 lantai.

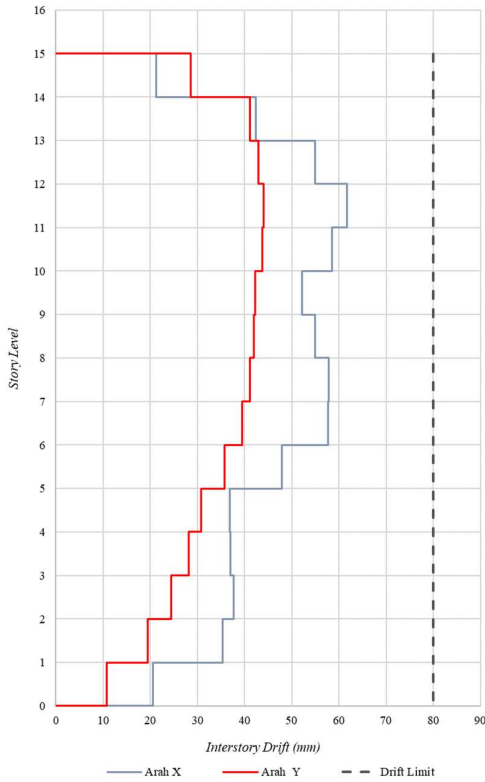
### C. Hasil Analisa Modifikasi CSPSW

Model CSPSW modifikasi dibedakan berdasarkan panjang dan besarnya *section coupling beam*, dimodelkan dengan 4 model, yaitu: CSPSW1-I, CSPSW2-I, CSPSW1-L, dan CSPSW2-L. Profil yang digunakan pada CSPSW modifikasi ditunjukkan pada **Tabel 2** diambil dari lantai 1-3. Dari model CSPSW yang sudah dimodifikasi kemudian dilakukan kajian hasil analisis, yaitu: Perbandingan Kapasitas Gaya Pemodelan, Perbandingan Energi Disipasi, dan Perbandingan Deformasi *out-of-plane*.

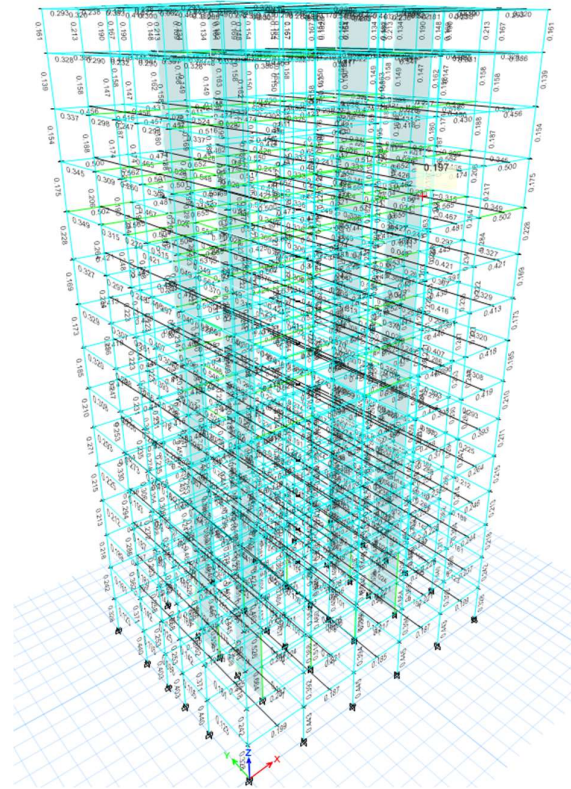
1) Perbandingan Kapasitas Gaya Pemodelan

Dari kurva *backbone* pada **Gambar 15**. CSPSW2-I memiliki kapasitas gaya geser lebih besar dari CSPSW2-L. Sehingga dapat disimpulkan model CSPSW modifikasi yang dibedakan berdasarkan panjang *coupling beam* tidak terlalu berpengaruh besar pada nilai gaya geser yang dihasilkan.





Gambar 13. Perpindahan Lateral Arah X dan Arah Y

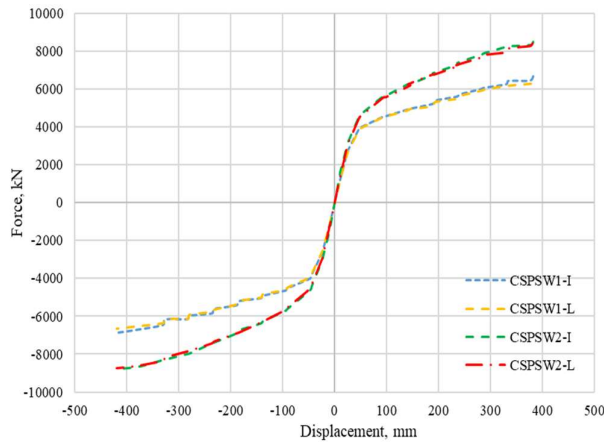


Gambar 14. Steel Check Design gedung 15 lantai

Tabel 8. Simpangan Antar Lantai Gempa Arah X dan Arah Y

Story	height (mm)	Perpindahan		Perpindahan Elastik		Story Drift		Drift Limit (mm)	Cek
		$\delta_x$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta e_x$ (mm)	$\delta e_y$ (mm)	$\Delta_x$ (mm)	$\Delta_y$ (mm)		
15	4000	104,114	79,142	3,279	4,400	21,314	28,600	80,000	OK
14	4000	100,835	74,742	6,519	6,326	42,373	41,119	80,000	OK
13	4000	94,316	68,416	8,458	6,596	54,977	42,874	80,000	OK
12	4000	85,858	61,820	9,483	6,776	61,640	44,044	80,000	OK
11	4000	76,375	55,044	8,996	6,730	58,474	43,745	80,000	OK
10	4000	67,379	48,314	8,033	6,495	52,215	42,218	80,000	OK
9	4000	59,346	41,819	8,440	6,455	54,860	41,958	80,000	OK
8	4000	50,906	35,364	8,897	6,321	57,831	41,087	80,000	OK
7	4000	42,009	29,043	8,878	6,077	57,707	39,501	80,000	OK
6	4000	33,131	22,966	7,364	5,491	47,866	35,692	80,000	OK
5	4000	25,767	17,475	5,665	4,737	36,823	30,791	80,000	OK
4	4000	20,102	12,738	5,691	4,325	36,992	28,113	80,000	OK
3	4000	14,411	8,413	5,804	3,768	37,726	24,492	80,000	OK
2	4000	8,607	4,645	5,444	2,987	35,386	19,416	80,000	OK
1	4000	3,163	1,658	3,163	1,658	20,560	10,777	80,000	OK





Gambar 15. Kurva Backbone CSPSW Modifikasi

2) Perbandingan Energi Disipasi

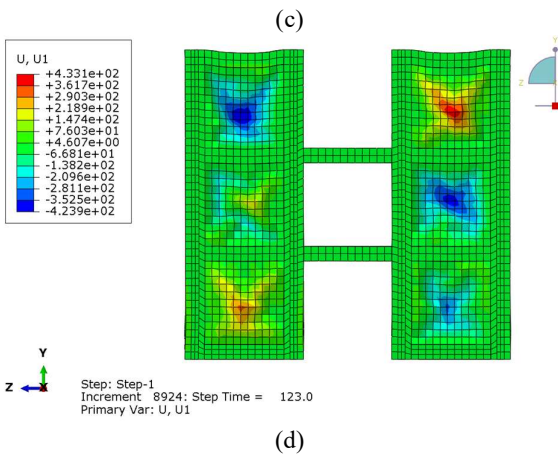
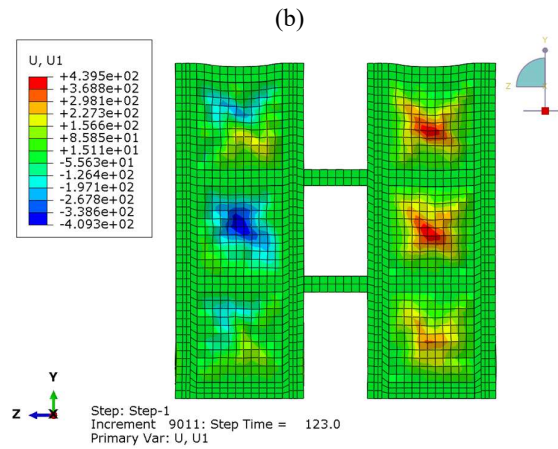
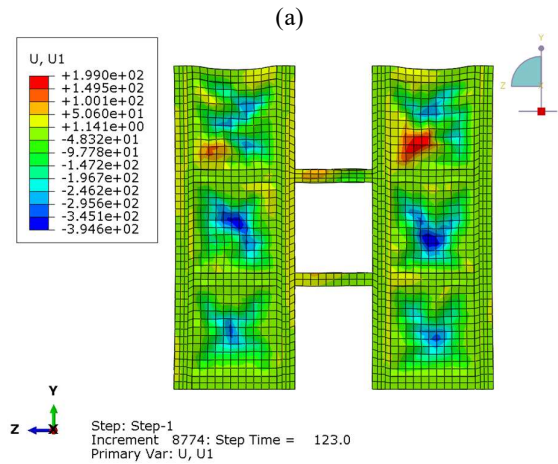
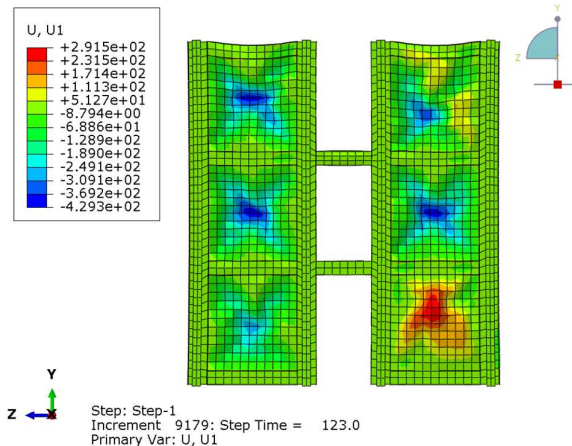
Energi disipasi dihitung berdasarkan luasan kurva histeresis pada masing-masing model CSPW yang dianalisis dengan menggunakan Abaqus. Total luasan kurva histeresis pada tiap model CSPSW modifikasi direkapitulasi pada Tabel 9.

Tabel 9. Disipasi Energi Model CSPSW Modifikasi

No	Model	Disipasi Energi (kN.m)
1	CSPSW1-I	4305,68
2	CSPSW1-L	4332,90
3	CSPSW2-I	6512,73
4	CSPSW2-L	6188,61

3) Perbandingan Deformasi Out-of-Plane

Deformasi out-of-plane yang terjadi pada infill plate pada setiap model CSPSW modifikasi yang dibedakan berdasarkan section dan panjang coupling beam (CB). Kontur deformasi out-of-plane maksimum yang terjadi pada infill plate dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Deformasi out-of-plane Model CSPSW Modifikasi, (a) CSPSW1-I, (b) CSPSW1-L, CSPSW2-I, CSPSW2-L.

Berdasarkan hasil output deformasi out-of-plane dapat disimpulkan bahwa model CSPSW Intermediate Coupling Beam mempunyai deformasi yang lebih besar dibandingkan dengan CSPSW Long Coupling Beam, nilai rekapitulasi deformasi out-of-plane dapat dilihat pada Tabel 10.

**Tabel 10.** Deformasi *Out-of-Plane* Model CSPSW Modifikasi

No	Model	Deformasi
		<i>Out-of-Plane</i> (mm)
1	CSPSW1-I	429,3
2	CSPSW1-L	394,6
3	CSPSW2-I	439,5
4	CSPSW2-L	433,1

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Pada pemodelan *Coupled Steel Plate Shear Wall* (CSPSW) menggunakan program bantu Abaqus, didapatkan hasil validasi spesimen CSPSW-FLEX yaitu simpangan senilai 233,6225 mm dan pada hasil validasi di Abaqus senilai 227,939 mm, serta dari hasil eksperimental didapatkan nilai gaya geser maksimum sebesar 1074 kN dan nilai dari validasi abaqus sebesar 1065,95 kN. Hasil validasi eksperimental CSPSW Flex dengan model numerik menggunakan Abaqus dengan selisih 0,75%
- 2) Model CSPW yang dibedakan berdasarkan panjang *coupling beam* tidak terlalu berpengaruh besar pada besarnya nilai disipasi energi, pada CSPSW1-I memiliki nilai disipasi energi sebesar 4305,68 kN.m dan CSPSW1-L memiliki nilai disipasi energi sebesar 4332,90 kN.m, pada CSPSW2-I memiliki nilai disipasi energi sebesar 6512,73 kN.m dan CSPSW2-L memiliki nilai disipasi energi sebesar 6118,61 kN.m.
- 3) Model CSPSW modifikasi yang dibedakan berdasarkan section berpengaruh besar pada penambahan nilai disipasi energi. Nilai disipasi energi pada CSPSW1-I sebesar 4305,68 kN.m sedangkan nilai disipasi energi pada CSPSW2-I sebesar 6512,73 kN.m, begitu juga pada long coupling beam antara CSPSW1-L sebesar 4332,90 kN.m dan CSPSW2-L sebesar 6188,61 kN.m.
- 4) Model CSPSW modifikasi yang dibedakan berdasarkan section dan panjang coupling beam juga berpengaruh pada nilai deformasi *out-of-plane*, yang mana deformasi model intermediate coupling beam lebih besar dibandingkan dengan long coupling beam, nilai deformasi out-of-plane pada CSPSW1-I sebesar 429,3 mm sedangkan pada CSPSW1-L sebesar 394,6 mm, dan CSPSW2-I sebesar 439,5 mm sedangkan pada CSPSW2-L sebesar 433,1 mm.

- 5) Dari perbandingan nilai disipasi energi dan juga gaya geser yang didapatkan pada masing-masing model CSPSW modifikasi dengan pembebanan siklik, dapat disimpulkan bahwa *intermediate coupling beam* (CSPSW-I) lebih efektif dibandingkan dengan *long coupling beam* (CSPSW-L).

#### Daftar Pustaka

- [1] R. Sabelli and M. Bruneau, *Steel Plate Shear Wall*. United States of America, 2007.
- [2] D. J. Borello and L. A. Fahnestock, "Seismic Design and Analysis of Steel Plate Shear Walls with Coupling," *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, no. 8, pp. 1263–1273, Aug. 2013, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000576.
- [3] M. Usefvand, A. Maleki, and B. Alinejad, "Investigate of damage index of coupled steel plate shear walls (CSPSW) system under seismic loading," *Structures*, vol. 28, pp. 614–625, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.09.018.
- [4] B. Budiono, "Perilaku Link Panjang Dengan Pengaku Diagonal Badan Pada Sistem Struktur Rangka Baja Tahan Gempa," pp. 1–12, 2011.
- [5] D. J. Borello, A. M. Asce, L. A. Fahnestock, and M. Asce, "Large-Scale Cyclic Testing of Steel-Plate Shear Walls with Coupling," 2017, doi: 10.1061/(ASCE).
- [6] C. H. Li *et al.*, "Cyclic test of a coupled steel plate shear wall substructure," *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 41, no. 9, pp. 1277–1299, Jul. 2012, doi: 10.1002/eqe.1180.
- [7] D. J. Borello and L. A. Fahnestock, "Seismic Design and Analysis of Steel Plate Shear Walls with Coupling," *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, no. 8, pp. 1263–1273, Aug. 2013, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000576.
- [8] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method by Daryl L. Logan 6th-ed\_2*, vol. 6. 2017.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. 2019.
- [10] PUSKIM PUPR, "Peta Gempa dan Respon Spektra," Kementerian PUPR. Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>
- [11] AISC 360-16, *Specification for Structural Steel Buildings*. 2016