

Studi Numerik Penambahan Pelat Pengaku Diagonal Pada *Steel Plate Shear Wall* (SPSW) dengan Adanya Variasi *Opening*

Novin Agustina Nur Putri^{1,*}, Budi Suswanto¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹
Koresponden*, Email: novinagustina15@gmail.com

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	06 Juli 2021	<p><i>Steel Plate Shear Wall (SPSW) is an earthquake-resistant structural system. SPSW is applied to high rise buildings. The application of SPSW in high rise buildings allows for an opening for the architectural needs of the building, but the modeling of the opening can affect the performance of the structure. In this study, validation was carried out using the Abaqus aid program related to the shear force achievement parameters and the hysteresis curve of the experimental model SPSW (S4) which has a circular opening in the middle of the span. In the results of the validation of the SPSW (S4) model using Abaqus, the maximum shear force achieved is 710 kN at a drift of 4.11%, while the experimental Alavi conducted 740 in at a drift of 3.80%. The results of the maximum shear force between modeling using Abaqus and Experimental conducted by Alavi are not much different, with value 4.05%. Then the SPSW model was applied by opening the box in the middle of the stretch of a 10-story building. The SPSW (S4) model can be used as a model for application in a 10-story building, but the opening shape is changed to a rectangle like a window. From the modeling results using the SAP 2000 program, the profiles for HBE are WF 600.300 and VBE using KC 800.300, with a thickness of 4 mm infill plate and 12 mm stiffener plate. Control analysis of the model is also carried out such as mass participation control, structure vibration period control, dynamic shear force control of the structure, displacement control and cross section control that meet the requirements.</i></p>
Diperbaiki	15 Agustus 2021	
Disetujui	15 Agustus 2021	

Keywords: *SPSW, opening, diagonal stiffened, finite element method*

Abstrak

Steel Plate Shear Wall (SPSW) merupakan sistem struktur penahan gempa yang diterapkan pada gedung tinggi. Penerapan SPSW pada gedung tinggi memungkinkan adanya *opening* untuk kebutuhan arsitektural gedung, akan tetapi pemodelan *opening* dapat mempengaruhi kinerja struktur. Pada penelitian ini, dilakukan validasi menggunakan program bantu Abaqus terkait parameter capaian gaya geser dan kurva histeresis model eksperimental SPSW(S4) yang memiliki *opening* berbentuk lingkaran pada tengah bentang. Pada hasil validasi model SPSW(S4) menggunakan Abaqus, capaian gaya geser maksimal yang dihasilkan yaitu 710 kN pada saat *drift* 4,11%, sedangkan pada eksperimental yang dilakukan Alavi 740 kN pada *drift* 3,80%. Hasil capaian gaya geser antara pemodelan menggunakan Abaqus dan Eksperimental yang dilakukan Alavi tidak jauh berbeda yaitu 4.05%. Kemudian dilakukan pengaplikasian model SPSW dengan *opening* kotak pada tengah bentang untuk Gedung 10 lantai. Sehingga model SPSW(S4) dapat dijadikan model untuk pengaplikasian pada gedung 10 lantai, akan tetapi bentuk *opening* diubah menjadi persegi panjang seperti jendela. Dari hasil pemodelan menggunakan program bantu SAP 2000 didapatkan profil untuk HBE yaitu WF 600.300 dan VBE menggunakan KC 800.300, dengan ketebalan pelat pengisi 4 mm dan pelat pengaku 12 mm. Pengontrolan analisis pada model juga dilakukan seperti kontrol partisipasi massa, kontrol periode getar struktur, kontrol gaya geser dinamis struktur, kontrol simpangan dan kontrol penampang yang telah memenuhi persyaratan.

Kata kunci: *SPSW, opening, pelat pengaku diagonal, metode elemen hingga*

1. Pendahuluan

Steel Plate Shear Wall (SPSW) merupakan sistem penahan beban lateral yang terdiri dari pelat baja yang terhubung dengan balok *Horizontal Boundary Element (HBE)* dan kolom *Vertical Boundary Element (VBE)*, dipasang pada satu atau beberapa tepi sepanjang ketinggian penuh struktur untuk membentuk dinding penopang [1]. SPSW pada struktur gedung biasanya dipasang pada sisi sumbu lemah dari struktur bangunan. Desain struktur tahan gempa untuk perencanaan

SPSW dijelaskan pada AISC *Seismic design guidelines* dan FEMA P-750. SPSW diharapkan dapat memberikan kapasitas deformasi inelastis yang signifikan, melalui pembentukan *plastic-hinge* di ujung HBE. VBE diharapkan tidak terjadi leleh akibat geser dan lentur kecuali pada dasar kolom [2].

Pada dasarnya terdapat dua macam tipe pelat pengisi SPSW, yaitu SPSW tanpa pengaku (*unstiffened*) dan dengan pengaku (*stiffened*). SPSW dengan pengaku dapat mencegah

terjadinya tekuk pada pelat pengisi dan SPSW dapat mengalami leleh maksimum sebelum tekuk terjadi, sehingga disipasi energi dapat diserap maksimal oleh struktur [3]. Sedangkan SPSW tanpa pengaku lebih cenderung mengalami pasca-tekuk akibat dari tegangan geser saat dilakukan pembebanan lateral secara maksimal [4]. Pada kondisi pasca tekuk, pelat pengisi yang tidak menggunakan pengaku, gaya tarik pada pelat pengisi setelah tekuk elastis ditransfer keluar dari bidang pelat ke sambungan HBE dan VBE. Serta penggunaan pelat tipis dan ramping mengakibatkan tingkat kapasitas tegangan geser yang sangat rendah di pelat. Sehingga efek *pinching* yang signifikan seringkali muncul dalam kurva histeretik, khususnya ketika sambungan balok ke kolom tidak daktil [5].

Salah satu keuntungan penggunaan SPSW untuk gedung tinggi yaitu memungkinkan adanya *opening* untuk kebutuhan arsitektural gedung dan pengerjaan konstruksinya lebih cepat, bila dibandingkan dengan dinding geser dari beton. Pada sistem struktur SPSW yang memiliki kebutuhan akan *opening* seringkali mempengaruhi kinerja sistem struktur, sehingga perencanaan bentuk dan dimensi *opening* harus diperhatikan. Penelitian eksperimental terkini yang dilakukan Alavi, dkk. [6] meninjau adanya *opening* berbentuk lingkaran dengan diameter 400mm atau 1/3 dari tinggi satu modul VBE dan menambahkan *diagonal stiffened* pada pelat pengisi, hasil penelitian dari pembebanan siklik, efek *pinching* pada spesimen tidak terjadi, akan tetapi nilai rasio daktilitas struktur SPSW dengan *opening* lebih rendah ($\mu = 8,7$) dari SPSW dengan *diagonal stiffened* tanpa *opening* ($\mu = 9,3$)

Penelitian eksperimental lanjutan terkait SPSW yang terdapat *opening* juga dilakukan Sabouri et al [7] meninjau *opening* jendela dengan ukuran 258 mm X 488 mm dan menambahkan *cross stiffened* pada pelat pengisi. Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan, bahwa pada spesimen dengan lebar efektif *opening* mencapai 63% dapat mengurangi kekakuan dan gaya geser *ultimate* sebesar 22% dan 36% dari spesimen SPSW tanpa *opening*. Akan tetapi pada sambungan horizontal dan vertikal yang mengelilingi *opening* mengalami *cracked* dan *reptured* dikarenakan kekakuan yang lebih tinggi dari pada pelat pengisi.

Penelitian eksperimental lainnya yang berfokus pada tipe pelat pengaku SPWS dilakukan oleh Hadad dkk. [8], dengan 3 tipe pelat pengaku yaitu *cross-stiffened* (CS-SPSW), *circular-stiffened* (CRS-SPSW), dan *diagonal stiffened* (DS-SPSW). Dari hasil eksperimental dapat ditarik kesimpulan, bahwa kekakuan tertinggi diperoleh oleh CS-SPSW, tetapi penurunan kekakuannya tidak menguntungkan, ditandai dengan ada beberapa *cross-stiffened* tidak bisa mencapai

pelelehan pertama. Selain itu, karena penyusutan kekakuan, stabilitas struktur perlu dievaluasi. Struktur dengan degradasi kekakuan bertahap, mampu mendistribusikan kembali deformasi plastis dan memberikan deformasi inelastik yang lebih besar. Dari aspek ini, kekakuan DS-SPSW menunjukkan degradasi yang lebih baik, mengindikasikan bahwa panel dengan pengaku diagonal berkinerja lebih baik.

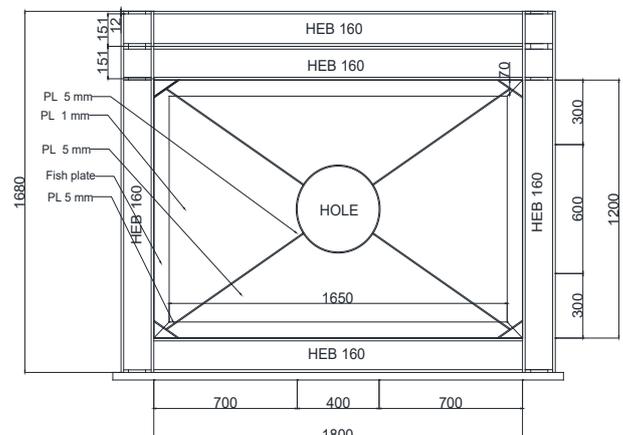
Penelitian SPSW ini fokus pada SPSW dengan adanya variasi *opening* dan penerapan pelat pengaku diagonal pada pelat pengisi. Metode yang akan digunakan yaitu *finite element method* (FEM) dengan program bantu Abaqus untuk validasi model, serta dilakukan pengaplikasian SPSW dengan adanya *opening* dan pelat pengaku pada perencanaan Gedung 10 Lantai dengan program bantu SAP 2000.

2. Metode

Pada penelitian ini dilakukan dua metode analisis yaitu dengan menggunakan metode elemen batas (*finite element method*) dengan program bantu Abaqus dan metode analisis respon spektrum untuk Gedung 10 lantai menggunakan program bantu SAP 2000. Analisis elemen batas digunakan untuk validasi model SPSW(S4) [6], sedangkan analisis *full load* menggunakan program bantu SAP 2000 digunakan untuk pengecekan model SPSW dengan *opening* ketika diterapkan pada gedung tinggi.

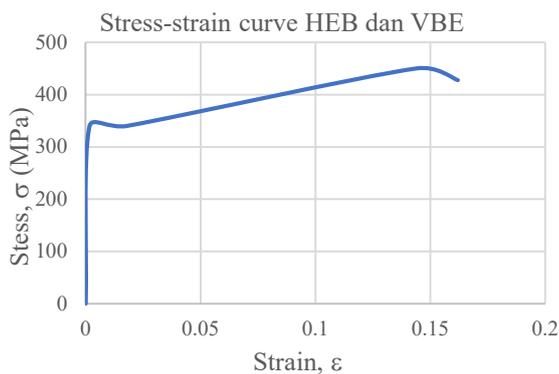
A. Validasi menggunakan Program Bantu Abaqus

Validasi model dilakukan pada spesimen SPSW(s4) dari penelitian Alavi [6]. Spesimen SPSW(s4) merupakan spesimen SPSW yang memiliki *opening* lingkaran pada tengah bentang, serta memiliki pengaku diagonal pada pelat pengisi. Metode elemen batas dilakukan dengan memodelkan elemen SPSW(s4) dengan rasio lebar-tinggi 1,33. Rasio lebar-tinggi ini mempresentasikan perbandingan antara lebar HBE 2 m dengan tinggi VBE 1.5 m.



Gambar 1. Model SPSW(S4) [6]

Pada **Gambar 1**, profil untuk HBE dan VBE menggunakan HEB 160, sedangkan pelat pengisi SPSW menggunakan pelat baja dengan ketebalan 1 mm dan pelat pengaku menggunakan tebal pelat 5mm. Elemen VBE dan HBE menggunakan material dengan tegangan leleh (f_y) = 340 MPa dan tegangan tarik (f_u) = 450 MPa, untuk pelat pengisi nilai f_y = 280 MPa dan f_u = 500 MPa, sedangkan pelat pengaku yang dipasang pada pelat pengisi nilai f_y = 340 MPa dan f_u = 470 MPa, dengan **Gambar 2** untuk grafik *stress-strain* pada HBE dan VBE.



Gambar 2. Grafik *Stress-Strain* HEB dan VBE

Spesimen dimodelkan dengan tipe elemen C3D8R yang artinya spesimen dimodelkan secara tiga dimensi dengan bentuk *solid continuum element* yang memiliki 8 nodal dimana setiap nodal memiliki tiga derajat kebebasan. R pada tipe elemen merupakan *reduce integration elements* bertujuan mengurangi integrasi elemen tanpa mengurangi hasil akurasi [9], [10]. Sambungan antar elemen menggunakan *surfaced-based tie constraints* yang pada setiap nodal permukaan pertama (*slave surface*) akan memiliki nilai sama untuk derajat kebebasannya dengan nodal pada permukaan kedua (*master surface*). Tipe *tie constraints* digunakan untuk menyatukan part yang menggunakan sambungan las [10].

Pembebanan pada spesimen dilakukan dengan metode *displacement control* menggunakan beban siklik yang mengacu protokol ATC-24 untuk pembebanan siklik, dengan pembebanan ke arah u_3 . Beban siklik diinput pada *boundary condition* dengan step dan displacement seperti pada **Gambar 3**.

B. Pengaplikasian SPSW dengan *Opening* menggunakan Program Bantu SAP 2000

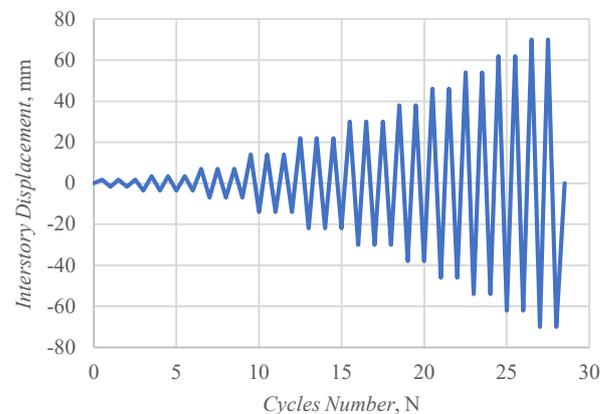
Pada awal pemodelan digunakan metode analisis menggunakan respons spektrum dengan pemodelan Gedung 10 lantai pada program bantu SAP 2000. Material yang digunakan untuk HBE dan VBE yaitu A572 Gr 50 dan untuk material pelat pengisinya yaitu A203 Gr B, dengan lebar bangunan 28 m, panjang bangunan 20 m, tebal pelat pengisi

4 mm, pelat pengaku 12 mm, lebar SPSW 5 m dan tinggi SPSW 4 m. **Tabel 1** merupakan profil yang digunakan pada analisis.

Tabel 1. Profil yang digunakan pada SAP 2000

Lantai	Kolom	Balok Arah Vertikal	Balok Arah Horizontal
1-4	KC 800x300x13x24	WF 600x300x12x20	WF 600x300x12x20
5-7	KC 700x300x13x24	WF 500x200x10x16	WF 500x200x10x16
8-10	KC 600x300x12x20	WF 400x200x8x13	WF 400x200x8x13

Pada program SAP 2000, 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 10 lantai seperti pada **Gambar 5** dengan ilustrasi SPSW yang memiliki *opening* persegi seperti pada **Gambar 4**.



Gambar 3. Pembebanan Siklik pada Abaqus sesuai Protokol ATC-24 [6]

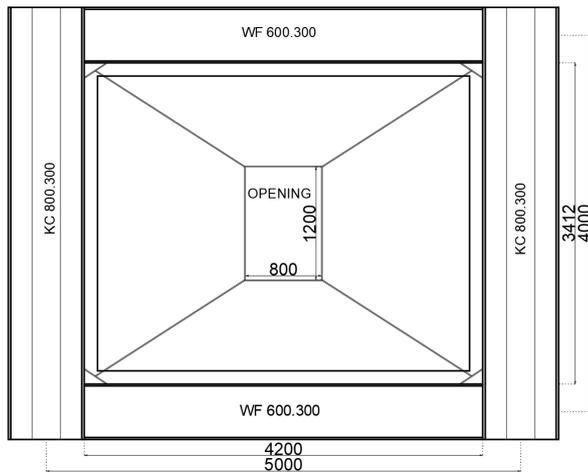
Pembebanan pada gedung 10 lantai diimplementasikan pada setiap lantai meliputi beban hidup, beban mati tambahan dan beban gempa yang berupa respons spektrum [11]. Pembebanan lantai yang digunakan mengikuti **Tabel 2**.

Pada gedung ini diasumsikan digunakan sebagai apartemen yang berada pada Surabaya, sehingga untuk wilayah gempa menggunakan Surabaya. Pada SNI 1726:2019 Tabel 3 [12] 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 2019

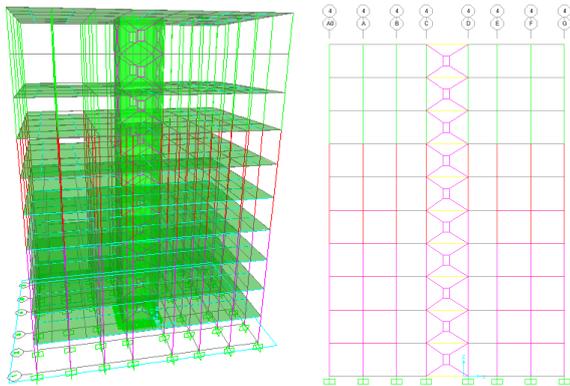
(PUSGEN-PUSKIM PUPR, 2019-2020), sehingga didapatkan grafik respon spektrum seperti pada **Gambar 6**.

Tabel 2. Beban Mati Tambahan dan Beban Hidup

No	Beban	Kg/m ²	Lantai
1	Beban mati tambahan pelat lantai	135,5	2-9
2	Beban mati tambahan pelat atap	35,5	10
3	Beban hidup pelat lantai	192	2-9
4	Beban hidup pelat atap	97	10

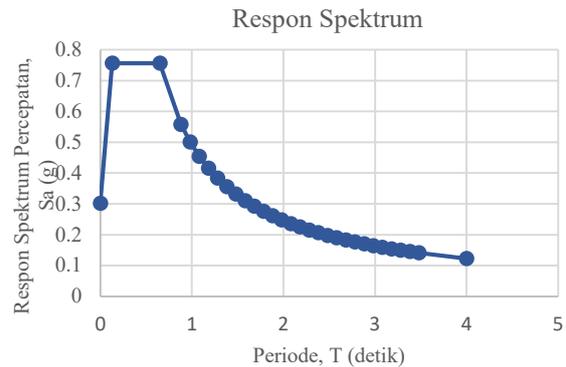


Gambar 4. Ilustrasi Pemodelan SPSW pada SAP 2000



Gambar 5. Pemodelan Gedung 10 Lantai menggunakan SAP 2000

Kontrol pemodelan SAP 2000 dilakukan untuk pengecekan model bangunan sesuai dengan batasan yang diisyaratkan SNI 1726:2019 [12] 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 6. Respon Spektrum

Kontrol terhadap partisipasi massa pada pemodelan struktur untuk perhitungan respon dinamis struktur harus sekurang-kurangnya 90% untuk arah x maupun arah y struktur, sesuai dengan SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.1[12]. Kontrol waktu getar alami fundamental struktur untuk mencegah bangunan mengalami getar terlalu besar. Berdasarkan SNI 1726:2019 didapatkan batasan perioda minimum seperti pada persamaan 1 dan batasan perioda maksimum seperti pada persamaan 2.

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

dimana:

T_a = Perioda fundamental struktur, s

h_n = Ketinggian total struktur, m

C_t = Parameter pendektan (SNI 1726:2019 Tabel 18)

x = Parameter pendektan (SNI 1726:2019 Tabel 18)

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

dimana:

C_u = 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 statik, kg

C_S = 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_x = Simpangan lantai

δ_{xe1} = Simpangan yang dihitung akibat beban gempa tingkat 1

C_d = faktor pembesaran defleksi (SNI 1726:2019 Tabel 12)

I_e = 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 AISC 360-16 [2], *steel check design* bertujuan untuk mengetahui kapasitas penampang yang digunakan, dengan batasan rasio tidak boleh melebihi 1,00.

3. Hasil dan Pembahasan

A. Validasi Model SPSW(S4)

Validasi pada spesimen SPSW(S4) yang dimodelkan pada program bantu Abaqus ditinjau dari hasil grafik histeresis, gaya geser maksimal, serta deformasi yang dihasilkan. Parameter tersebut digunakan sebagai pembandingan analisis hasil dari eksperimental Alavi.

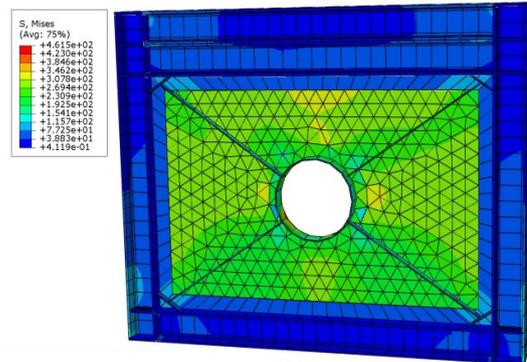
Initial tears locations



307-346 MPa di beberapa titik dan pada pelat pengaku lingkaran 423-461 MPa, seperti pada **Gambar 8**.

Pada *drift* 2,4% SPSW (s4) eksperimental Alavi terjadi *local tears* pada pelat pengisi yang berada dekat dengan pelat pengaku lingkaran, seperti pada **Gambar 7**. Meskipun terjadi *local tears*, spesimen masih dapat menyerap energi hingga 740 kN pada *drift* 3,8%, kemudian spesimen mengalami degradasi dan berhenti pada siklus pembebanan ke-28.

Sedangkan pemodelan spesimen SPSW(s4) menggunakan Abaqus, pada *drift* 2,66%, pada pelat pengaku lingkaran mengalami tegangan paling besar (594-648 MPa) dan pada pelat pengisinya terjadi tegangan (432-486 MPa), seperti pada **Gambar 9**. Gaya geser maksimum yang terjadi 710 kN pada *drift* 4,11%, seperti pada eksperimental, spesimen juga mengalami degradasi energi yang diserap hingga siklus ke-28. Kondisi akhir dari spesimen dapat dilihat pada **Gambar 10** untuk pemodelan Abaqus, dan **Gambar 11** hasil eksperimental Alavi.

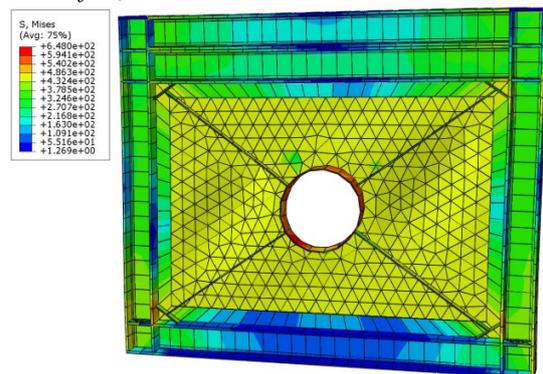


Gambar 8. Pelelehan pertama pada SPSW(s4) di Abaqus saat *drift* 0,16%

Tabel 3. Hasil perbandingan Drift Rasio dan Nilai Gaya Geser

	Eksperimental Alavi	Pemodelan Abaqus
Drift saat pelelehan pertama	0.59%	0.16%
Drift saat gaya geser Maksimal	3.80%	4.11%
Nilai gaya geser maksimal	740 kN	710 kN

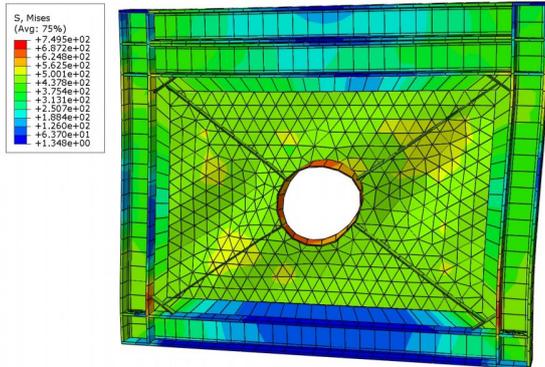
Pada **Tabel 3**, hasil eksperimental Alavi SPSW(s4) memiliki pelelehan awal yang terjadi pada *displacement* 8,9 mm (0,59%), sedangkan pada pemodelan Abaqus pelelehan awal terjadi pada *displacement* 2,5 mm (0,16%). Kondisi pelelehan terjadi pada pelat pengisi yang tegangannya mencair



Gambar 9. Tegangan Von-Mises saat *drift* 2.66%

Gambar 12 dan **Gambar 13** menunjukkan kurva histeresis spesimen SPSW(s4) pada eksperimen oleh Alavi dan pemodelan abaqus, dengan nilai gaya geser maksimal pada eksperimen oleh Alavi 740 kN pada *drift* 3,8% [6] dan pada pemodelan menggunakan Abaqus 710 kN pada *drift* 4,11%. Selisih dari hasil perbandingan gaya geser adalah 4,05% dari

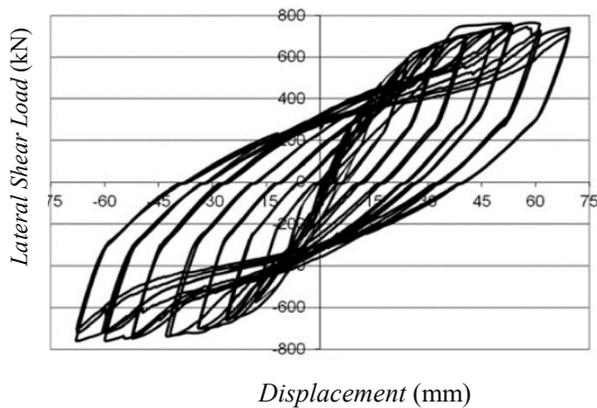
eksperimental. Pada **Gambar 14** merupakan gabungan dari kurva histeresis eksperimental Alavi dan pemodelan Abaqus.



Gambar 10. Tegangan Von-Mises saat drift 4,62%



Gambar 11. Tegangan saat drift 4,4% eksperimental Alavi [6]



Gambar 12. Kurva Histeresis SPSW (s4) eksperimental Alavi [6]

kontrol simpangan antar lantai dan analisis kontrol penampang. Berikut rincian pembahasan terkait kontrol terhadap model:

1) Kontrol Partipasi Massa

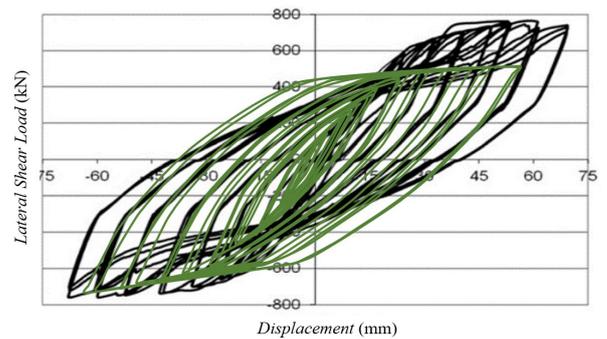
Menurut SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.1 hasil analisis didapatkan partisipasi masa ragam terkombinasi paling sedikit 90% dari massa aktual dalam masing-masing arah. Dari hasil analisis menggunakan program bantu SAP 2000, didapatkan partisipasi massa arah X: 94,12 % dan partisipasi massa arah Y: 94,11 % seperti pada **Tabel 4**, maka dapat disimpulkan analisis struktur telah memenuhi syarat partisipasi massa ragam paling sedikit 90%.

Tabel 4. Partisipasi massa

Participation Ratios				
OutputCase	ItemType	Item	Static	Dynamic
Text	Text	Text	Percent	Percent
MODAL	Acceleration	UX	99,9189	94,1243
MODAL	Acceleration	UY	99,9351	94,1088
MODAL	Acceleration	UZ	0,0059	0,0004445

2) Kontrol Periode Fundamental Struktur

Untuk mendapatkan struktur bangunan yang kaku, nilai waktu getar alami (T) dari struktur harus dibatasi sesuai SNI1726:2019. Berdasarkan SNI 1726:2019 persamaan 26 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.



Gambar 13. Gabungan Kurva Histeresis Eksperimental Alavi dan pemodelan Abaqus

$$T_a = C_t \times h_n^x = 0,7762 \text{ s}$$

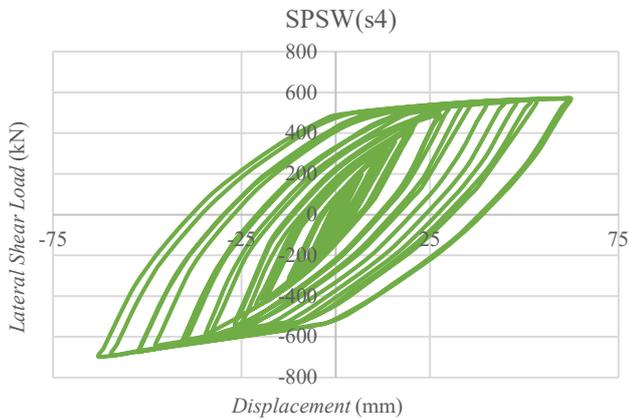
Untuk periode maksimum nilai peroda tersebut dikali faktor C_u . Periode maksimal menentukan batas atas periode yang dihitung, harus ditinjau parameter percepatan *respons spectral design* pada 1 detik ($S_{D1} > 0,4$) sehingga untuk C_u diambil 1,4.

B. Pemodelan SPSW dengan Opening pada Gedung 10 Lantai

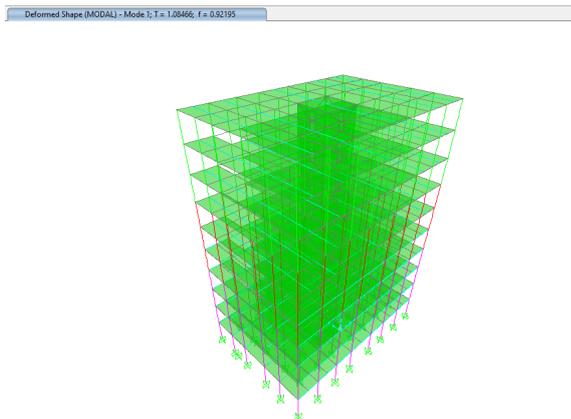
Pada pemodelan gedung 10 lantai dengan adanya SPSW dengan *opening* pada *core* bangunan menggunakan program bantu SAP 2000, dilakukan beberapa kontrol pada pemodelan meliputi kontrol partisipasi massa, kontrol periode fundamental struktur, kontrol gaya dasar dinamis struktur,

$$T = T_a \times C_u = 1,0867 \text{ s}$$

Pada analisis menggunakan program bantu SAP 2000, periode yang didapatkan pada modal 1 yaitu 1,0846 s tertera pada **Gambar 15**, sehingga periode tersebut kurang dari periode maksimum dan masih memenuhi ketentuan.



Gambar 14. Kurva Histeresis Validasi Spesimen SPSW(s4) dengan Abaqus



Gambar 15. 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_t) kurang dari 100% dari gaya geser (V) yang dihitung melalui metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan V/V_t . Pada Tabel 12 SNI 1726:2019 untuk koefisien modifikasi respon (R) dinding geser pelat baja khusus yaitu 8 dan faktor pembesaran defleksi (C_d) yaitu 6,5. Koefisien respons seismik didapat sebagai berikut:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{R/I_e} = 0,0945$$

Nilai C_s tidak boleh lebih dari:

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \times (R/I_e)} = 0,0566$$

Nilai C_s tidak kurang dari:

$$C_s = 0,044 \times S_{DS} \times I_e = 0,0333$$

Sehingga nilai C_s diambil 0,0566

Dari hasil analisis SAP 2000, diperoleh berat total struktur seperti pada **Tabel 5** dengan total berat struktur $W = 7.651.694,81 \text{ kg}$.

Tabel 5. Berat Struktur

OutputCase	CaseType	GlobalFZ Kgf
DEAD	LinStatic	6.047.742,31
LIVE	LinStatic	951.152
BEBAN TAMBAHAN W	LinStatic	652.800,5
		7.651.694,81

Sehingga untuk gaya geser statik, sebagai berikut:

$$V_{statik} = C_s \times W = 433239,45 \text{ kg}$$

Dari hasil analisis dinamis gaya geser pada SAP 2000, diperoleh gaya geser akibat gempa x dan y seperti pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Gaya Geser akibat Gempa x dan y

OutputCase	GlobalFX kgf	GlobalFY kgf
Ex	407837,6	2207,52
Ey	2207,56	365638,94

Kontrol gaya geser:

Gempa arah x

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

$$407837,6 \leq 433239,45 \quad (\text{Not OK})$$

Gempa arah y

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

$$365638,94 \leq 433239,45 \quad (\text{Not OK})$$

Dari kontrol di atas, bangunan belum memenuhi syarat nilai akhir respons. Pada Pasal 7.9.4.2 SNI 1726:2019 dijelaskan apabila gaya geser dasar hasil analisis kurang dari 100%, maka harus diperbesar dengan faktor skala $\frac{C_s \times W}{V}$

$$\frac{C_s \times W}{V} = \frac{0,0566 \times 7651694,81}{407837,6} = 1,06228$$

Arah y

$$\frac{C_s \times W}{V} = \frac{0,0566 \times 7651694,81}{365638,94} = 1,18488$$

Setelah dikalikan skala, didapatkan gaya geser seperti pada

Tabel 7.

Kontrol gaya geser:

Gempa arah x

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

$$462770,82 \geq 433239,45 \quad (\text{OK})$$

Gempa arah y

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

462645,19 ≥ 433239,45 (OK)

Dari kontrol diatas dapat disimpulkan bahwa analisis struktur gedung di atas masih memenuhi persyaratan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.

Tabel 7. Gaya Geser setelah Pembesaran

OutputCase	GlobalFX	GlobalFY
	kgf	kgf
Ex	462770,82	2504,86
Ey	2793,24	462645,19

4) Kontrol Simpangan Antar Lantai

Pembatasan simpangan antar lantai suatu struktur bertujuan untuk mencegah kerusakan non-struktur dan ketidaknyamanan penghuni. Simpangan yang terjadi dari hasil dinamis harus lebih kecil dari simpangan hasil analisis. Simpangan ijin Δ_i untuk tingkat 1:

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

Simpangan ijin Δ_i untuk tingkat 2:

$$\delta_x = (\delta_{xe2} - \delta_{xe1}) \frac{C_d}{I_e}$$

Batasan ijin simpangan lantai diatur pada Tabel 16 SNI 1726:2019, dengan semua struktur lainnya 0,02 h_{ax} , dengan tinggi antar lantai 4 m. Sehingga pada analisis menggunakan program bantu SAP 2000 didapatkan simpangan antar lantai untuk gempa arah x dan y seperti pada **Tabel 8** dan **Tabel 9**.

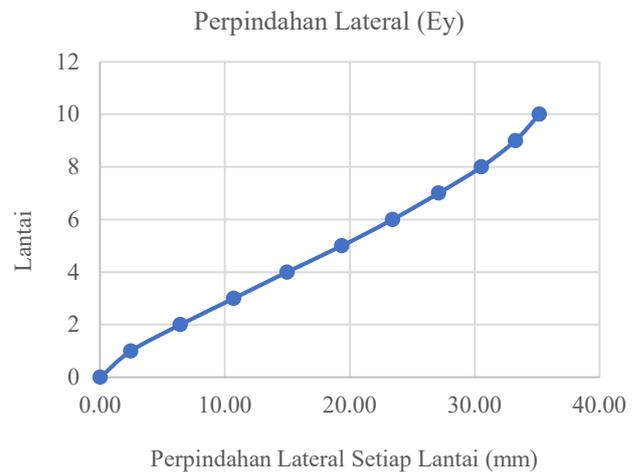
Pada **Gambar 16** dan **Gambar 17** merupakan hasil perpindahan lateral yang dialami Gedung SPSW, dengan perpindahan arah Y lebih besar dibandingkan dengan arah X. Sedangkan **Gambar 18** dan **Gambar 19** menunjukkan simpangan antar lantai, pada arah Y simpangan terbesar berada pada lantai 5, sedangkan arah X simpangan terbesar berada pada lantai 7.

Tabel 8. Simpangan antar lantai gempa arah Y

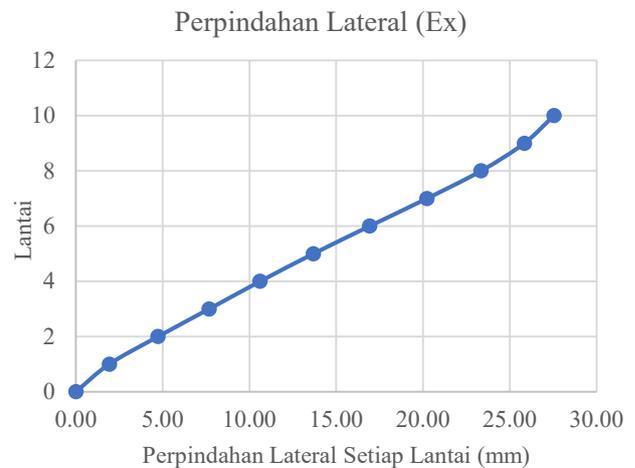
Lantai	Elevasi (m)	δ_e (mm)	δ_{xe} (mm)	δ_x (mm)	Δ ijin (mm)	Ket
10	40	35.17	1.92	12.48	80.00	OK
9	36	33.25	2.72	17.68	80.00	OK
8	32	30.53	3.43	22.30	80.00	OK
7	28	27.10	3.68	23.92	80.00	OK
6	24	23.42	4.07	26.46	80.00	OK
5	20	19.35	4.40	28.60	80.00	OK
4	16	14.95	4.26	27.69	80.00	OK
3	12	10.69	4.28	27.82	80.00	OK
2	8	6.41	3.96	25.74	80.00	OK
1	4	2.45	2.45	15.93	80.00	OK
0	0	0.00	0.00	0.00	80.00	OK

Tabel 9. Simpangan antar Lantai Gempa arah X

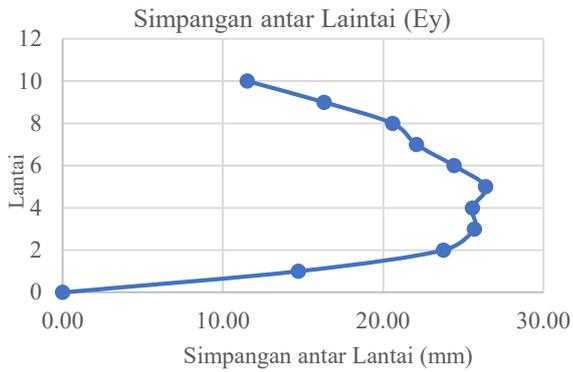
Lantai	Elevasi (m)	δ_e (mm)	δ_{xe} (mm)	δ_x (mm)	Δ ijin (mm)	Ket
10	40	27.54	1.71	11.12	80.00	OK
9	36	25.83	2.49	16.19	80.00	OK
8	32	23.34	3.12	20.28	80.00	OK
7	28	20.22	3.30	21.45	80.00	OK
6	24	16.92	3.24	21.06	80.00	OK
5	20	13.68	3.07	19.96	80.00	OK
4	16	10.61	2.93	19.05	80.00	OK
3	12	7.68	2.95	19.18	80.00	OK
2	8	4.73	2.81	18.27	80.00	OK
1	4	1.92	1.92	12.48	80.00	OK
0	0	0.00	0.00	0.00	80.00	OK



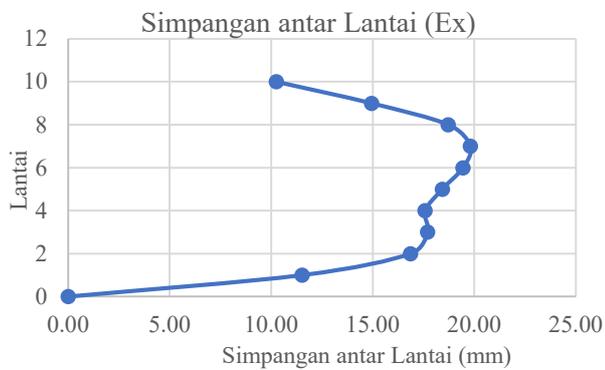
Gambar 16. Perpindahan Lateral Arah Y



Gambar 17. Perpindahan lateral arah X



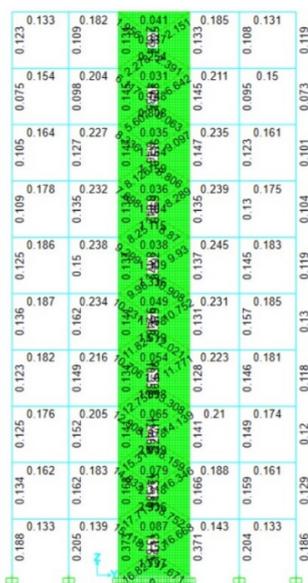
Gambar 18. Simpangan antar Lantai arah Y



Gambar 19. Simpangan antar lantai arah X

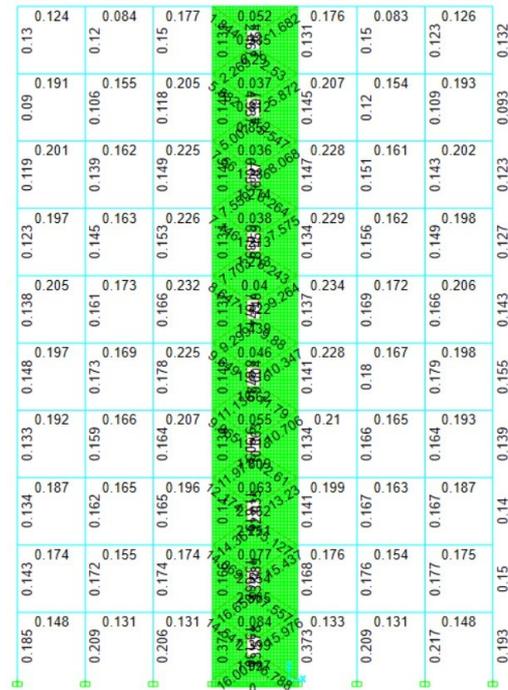
5) Analisis Kontrol Penampang

Pada analisis menggunakan program bantu SAP 2000 kontrol kekuatan penampang diperlukan untuk mengetahui dan memastikan penampang yang digunakan telah sesuai dengan persyaratan. Persyaratan yang digunakan pada SAP 2000 yaitu AISC 360-16.



Gambar 20. Steel Check Design arah y

Dari hasil *steel check desain* seperti pada Gambar 20 dan Gambar 21 yang menggunakan persyaratan AISC 360-16 untuk elemen balok dan kolom memiliki rasio yang tidak melebihi 0,5, sehingga aman digunakan sebagai profil bangunan.



Gambar 21. Steel Check Design arah x

4. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Pada pemodelan *Steel Plate Shear Wall* (SPSW) menggunakan program bantu Abaqus, didapatkan hasil validasi spesimen SPSW(S4) yaitu nilai gaya geser maksimal yang tercapai tidak jauh berbeda, pada eksperimental 740 kN saat *drift* 3,80% dan pada pemodelan menggunakan Abaqus 710 kN saat *drift* 4,11%, sehingga selisih dari hasil perbandingan gaya geser adalah 4,05% dari eksperimental.
- 2) Pola kegagalan pada spesimen SPSW(S4) terjadi pada pelat pengisi, hal ini ditandai dengan adanya bidang tarik diagonal pada eksperimental Alavi. Pada pemodelan Abaqus pelelehan pertama terjadi pada pelat pengisi ditandai dengan tercapainya tegangan pelat pengisi 307 MPa.
- 3) Pada pengaplikasian SPSW dengan *opening* pada Gedung 10 lantai di dapatkan profil untuk HBE yaitu WF 600x300 dan VBE yaitu KC 800x300, dengan menggunakan pelat pengisi ketebalan 4 mm dan pelat pengaku 12 mm.

- 4) Pada model Gedung 10 lantai dengan SPSW yang terdapat *opening*, kontrol desain struktur terkait kontrol partisipasi massa, kontrol periode getar struktur, kontrol gaya geser dinamis struktur, kontrol simpangan, dan kontrol penampang telah memenuhi persyaratan.

Daftar Pustaka

- [1] R. S.. Bruneau, Michel Ph.D.,P.Eng; Uang, Chia-Ming Ph.D.; Sabelli, *Ductile Design of Steel Structures*. United States of America: The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [2] AISC, “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-10,” *Struct. Anal. Des. Tall Build.*, pp. 355–410, 2011, doi: 10.1201/b11248-8.
- [3] M. Wang, W. Yang, Y. Shi, and J. Xu, “Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 107, pp. 194–210, 2015, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.01.007.
- [4] A. Schumacher and G. Y. Grondin, “Connection of Infill Panels in Steel Plate Shear Wall,” no. 217, 1997.
- [5] C. Dou, Z. Q. Jiang, Y. L. Pi, and Y. L. Guo, “Elastic shear buckling of sinusoidally corrugated steel plate shear wall,” *Eng. Struct.*, vol. 121, pp. 136–146, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.04.047.
- [6] E. Alavi and F. Nateghi, “Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 89, pp. 9–20, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2013.06.005.
- [7] S. Sabouri-Ghomi and S. Mamazizi, “Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 86, pp. 56–66, 2015, doi: 10.1016/j.tws.2014.10.005.
- [8] O. Haddad, N. H. Ramli Sulong, and Z. Ibrahim, “Cyclic performance of stiffened steel plate shear walls with various configurations of stiffeners,” *J. Vibroengineering*, vol. 20, no. 1, pp. 459–476, 2018, doi: 10.21595/jve.2017.18472.
- [9] D. L. Logan, *A First Course In The Finite Element Method*. 2012.
- [10] A. Khennane, *Introduction to FEA using Matlab and ABAQUS*. 2013.
- [11] Badan Standarisasi Nasional, “Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural Badan Standardisasi Nasional (SNI 1729:2015),” *Bandung*, pp. 1–289, 2015, [Online]. Available: www.bsn.go.id.
- [12] Badan Standardisasi Nasional, “Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung,” *Tata Cara Perenc. Ketahanan Gempa Untuk Strukt. Bangunan Gedung dan Non Gedung*, no. 8, p. 254, 2019.