

# Studi Komparatif Kinerja Seismik Gedung 13 Lantai RC-SW dan USPSW-CFST Berbasis Analisis Respons Spektrum di Surabaya

Ifarrel Rachmanda Hariyanto<sup>1</sup>, Yuyun Tajunnisa<sup>2</sup>, Buntetrian Shanti<sup>3</sup>, Kohar Yudoprasetyo<sup>4</sup>, Moh. Safii Mansur<sup>5</sup>, Yosi Novisari Wibowo<sup>6</sup>, Moh. Fadhlans Rosyidi<sup>7</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6,7</sup>Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Email: ifarrelrh@its.ac.id, yuyun\_t@its.ac.id, buntetrianashanti@gmail.com, koharyudo@its.ac.id, mohsafiimansur@its.ac.id, yosi.wibowo@its.ac.id, [fadhlansrosyidi@its.ac.id](mailto:fadhlansrosyidi@its.ac.id) Email Penulis Korespondensi: [ifarrelrh@its.ac.id](mailto:ifarrelrh@its.ac.id)

| Info Artikel                                                                                                                                                    | Abstrak                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Kata Kunci:</b><br>Analisis Respons Spektrum<br>Concrete-Filled Steel Tube<br>Kinerja Seismik<br>Pondasi Tiang Pancang<br>Unstiffened Steel Plate Shear Wall | <p>Bangunan bertingkat memerlukan sistem penahan gaya lateral yang mampu mengendalikan simpangan dan tetap efisien terhadap berat struktur. Penelitian ini membandingkan struktur eksisting gedung perkuliahan 13 lantai setinggi 56 m di Surabaya yang menggunakan portal momen beton bertulang dengan reinforced-concrete shear wall (RC-SW) dan struktur modifikasi yang menggunakan unstiffened steel plate shear wall (USPSW) dengan kolom concrete-filled steel tube (CFST). Analisis dilakukan dengan pemodelan tiga dimensi dan respons spektrum sesuai SNI 1726:2019. Hasil analisis kemudian digunakan untuk memeriksa panel USPSW, elemen batas, sambungan, pondasi tiang, serta biaya material. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya meninjau perilaku panel atau elemen secara terpisah, penelitian ini membandingkan respons struktur, kapasitas elemen utama, pondasi, dan biaya pada satu objek gedung. Hasil menunjukkan partisipasi massa kedua model lebih dari 99%. Periode fundamental turun dari 1,76 s menjadi 1,61 s dan berat model berkurang 28,15%. Simpangan maksimum arah Y turun 20,9%, sedangkan arah X naik 8,3% namun masih memenuhi batas izin. Pada model modifikasi tanpa shear wall, simpangan maksimum mencapai 64,34 mm pada arah X dan 54,59 mm pada arah Y, sedangkan setelah USPSW dipasang turun menjadi 24,21 mm dan 22,71 mm. Panel kritis menggunakan pelat 4,8 mm dengan rasio kebutuhan-kapasitas 0,72, sedangkan rasio interaksi EBV CFST sebesar 0,91. Pondasi modifikasi menggunakan spun pile D600 mm sepanjang 36 m dan memenuhi pemeriksaan yang dilakukan. Biaya struktur bawah turun 7,51%, tetapi biaya material total meningkat sekitar 160% dari Rp37,01 miliar menjadi Rp96,24 miliar. Dari hasil tersebut, USPSW-CFST dapat mengurangi berat struktur dan simpangan arah Y, tetapi belum memberikan hasil yang lebih baik pada seluruh parameter dan biaya.</p> |
| <b>Keywords:</b><br>Concrete-Filled Steel Tube<br>Pile Foundation<br>Response-Spectrum Analysis<br>Seismic Performance<br>Unstiffened Steel Plate Shear Wall    | <p>A high-rise building requires a lateral-force-resisting system that can control drift without adding excessive structural weight. This study compares a 13-story, 56 m high lecture building in Surabaya. The existing structure uses a reinforced-concrete moment frame with reinforced-concrete shear walls (RC-SWs), while the modified structure uses unstiffened steel plate shear walls (USPSWs) with concrete-filled steel tube (CFST) columns. Three-dimensional response-spectrum analysis was carried out according to SNI 1726:2019. The analysis results were then used to check the USPSW panels, boundary elements, connections, pile foundation, and material cost. Unlike previous studies that mostly examined panels or structural components separately, this study compares structural response, critical-element capacity, foundation design, and cost for the same building. Both models reached more than 99% cumulative mass participation. The fundamental period decreased from 1.76 s to 1.61 s and the model weight decreased by 28.15%. Maximum Y-direction drift decreased by 20.9%, while X-direction drift increased by 8.3% but remained within the allowable limit. In the modified model without shear walls, maximum drift reached 64.34 mm in the X direction and 54.59 mm in the Y direction; after the USPSWs were included, the values decreased to 24.21 mm and 22.71 mm. The critical panel used a 4.8 mm plate with a demand-to-capacity ratio of 0.72, while the CFST vertical boundary element had an interaction ratio of 0.91. The modified foundation used 600 mm diameter, 36 m long spun piles and satisfied the adopted checks. Foundation material cost decreased by 7.51%, but total material cost increased by about 160%, from IDR 37.01 billion to IDR 96.24 billion. These results show that USPSW-CFST can</p>                                                              |

reduce structural weight and Y-direction drift, but it does not improve all evaluated parameters or the total material cost.

*JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License*



## 1. PENDAHULUAN

Bangunan bertingkat banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan ruang pada kawasan perkotaan. Dalam perencanaannya, beban gempa menjadi salah satu hal yang perlu diperhatikan karena semakin tinggi bangunan, semakin besar pula pengaruh gaya lateral terhadap struktur. Pada gedung pendidikan yang berada di wilayah gempa, sistem penahan gaya lateral berfungsi untuk membatasi simpangan dan menjaga kestabilan bangunan. Dinding geser beton bertulang (reinforced-concrete shear wall/RC-SW) banyak digunakan karena mempunyai kekakuan dan kekuatan lateral yang cukup tinggi, tetapi respons struktur tetap dipengaruhi oleh tata letak dinding, kekakuan elemen, dan cara perhitungan beban gempa [1]-[3]. Selain itu, berat sendiri struktur juga memengaruhi gaya inersia dan reaksi yang diteruskan ke pondasi. Oleh karena itu, penggunaan sistem struktur yang lebih ringan tetapi tetap mampu mengendalikan simpangan menjadi salah satu alternatif dalam perencanaan ulang gedung bertingkat.

Salah satu sistem penahan gaya lateral yang dapat digunakan adalah steel plate shear wall (SPSW). Pada sistem ini, pelat baja tipis dapat mengalami tekuk awal, kemudian membentuk medan tarik diagonal yang tetap bekerja dalam menahan gaya lateral. Mekanisme tersebut membuat SPSW mempunyai rasio kekuatan terhadap berat yang baik serta kemampuan disipasi energi yang tinggi [4]-[7], [11], [24]. Pada unstiffened steel plate shear wall (USPSW), perilaku panel juga dipengaruhi oleh elemen batas dan sambungannya. Kekakuan balok, kolom, sambungan, serta lantai komposit akan memengaruhi distribusi gaya pada sistem [10]-[12], [26], [27]. Untuk elemen batas vertikal, concrete-filled steel tube (CFST) dapat digunakan karena tabung baja mengekang inti beton, sedangkan beton di dalam tabung membantu meningkatkan kapasitas tekan dan mengurangi kemungkinan tekuk lokal [8], [13], [18], [23], [29].

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas perilaku SPSW dan CFST melalui pengujian maupun analisis numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut medan tarik, bentuk panel, kekakuan elemen batas, jenis sambungan, dan interaksi panel dengan rangka berpengaruh terhadap kekuatan, deformasi luar bidang, dan perilaku siklik SPSW/USPSW [8], [10]-[12], [18]-[20], [26], [27]. Pada bangunan bertingkat, konfigurasi sistem dan karakteristik gempa juga dapat mengubah respons struktur [28], [30]. Penelitian pada gedung di Surabaya menunjukkan bahwa penambahan shear wall dapat meningkatkan frekuensi natural struktur sekitar 29,55% [22]. Penelitian lain mengenai modifikasi gedung baja-komposit dengan pengaku eksentris dan pemodelan vertical shear link juga menunjukkan bahwa susunan elemen penahan lateral perlu diperhatikan dalam analisis struktur [31], [32].

Penelitian terdahulu umumnya membahas perilaku panel SPSW, elemen CFST, sambungan, atau respons nonlinier pada model tertentu. Pembahasan mengenai pengaruh perubahan sistem terhadap pondasi dan biaya pada objek gedung yang sama masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini membandingkan gedung eksisting dengan RC-SW dan gedung modifikasi dengan USPSW-CFST dengan tetap mengontrol fungsi, pembebanan, dan konfigurasi utama bangunan. Perbandingan tidak hanya dilakukan pada respons dinamis, tetapi juga pada elemen kritis, pondasi, dan biaya material. Posisi penelitian terhadap beberapa penelitian sebelumnya ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Posisi Penelitian terhadap Studi Terdahulu

| Studi              | Sistem/Metode                 | Fokus Utama                     | Celah terhadap Penelitian Ini                                |
|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Wang et al. [11]   | USPSW, eksperimen + numerik   | Histeresis, kekuatan, deformasi | Skala komponen, tanpa pembanding RC-SW, pondasi, dan biaya   |
| Tan et al. [8]     | BRSPSW + rangka komposit      | Interaksi panel-rangka batas    | <i>Subassemblage</i> dua lantai, bukan evaluasi gedung penuh |
| Chen et al. [18]   | CFST + BRSPSW                 | Uji siklik dan model FE         | Fokus perilaku komponen, tanpa konsekuensi pondasi/biaya     |
| Verma & Sahoo [26] | SPSW + lantai komposit        | Pengaruh slab dan sambungan     | Spesimen satu lantai, tanpa perbandingan sistem bangunan     |
| Jin et al. [30]    | Gedung bertingkat SPSW, NLTHA | Drift, residu, fragilitas       | Tanpa <i>baseline</i> RC-SW dan tanpa evaluasi pondasi/biaya |

| Studi          | Sistem/Metode                         | Fokus Utama                                      | Celah terhadap Penelitian Ini                        |
|----------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Penelitian ini | RC-SW vs USPSW-CFST, respons spektrum | Respons global + elemen kritis + pondasi + biaya | Evaluasi terintegrasi pada geometri gedung yang sama |

Perbedaan utama penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada ruang lingkup perbandingannya. Penelitian ini tidak mengusulkan jenis SPSW baru, tetapi membandingkan perubahan periode, simpangan, stabilitas, dan berat struktur dengan hasil pemeriksaan panel, elemen batas, pondasi tiang, serta biaya material pada gedung yang sama. Dengan cara tersebut dapat diketahui apakah pengurangan berat struktur juga diikuti oleh perbaikan respons gempa dan pengurangan biaya.

Penelitian ini bertujuan membandingkan struktur eksisting RC-SW dengan struktur modifikasi USPSW-CFST pada gedung perkuliahan 13 lantai di Surabaya. Parameter yang dibandingkan meliputi partisipasi massa, periode fundamental, gaya geser dasar setelah penskalaan, simpangan antar lantai, P-Delta, berat model, kapasitas panel dan elemen batas, perencanaan pondasi, serta biaya material. Hasil perbandingan digunakan untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada struktur setelah sistem RC-SW dimodifikasi menjadi USPSW-CFST.

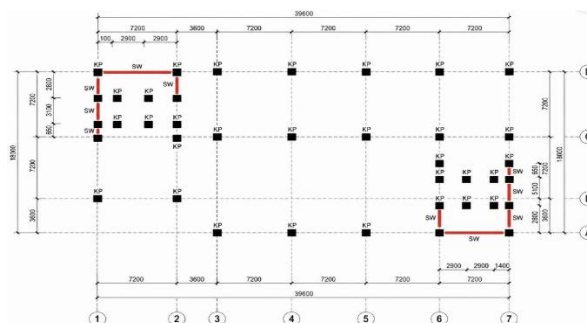
## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Objek dan Konfigurasi Struktur

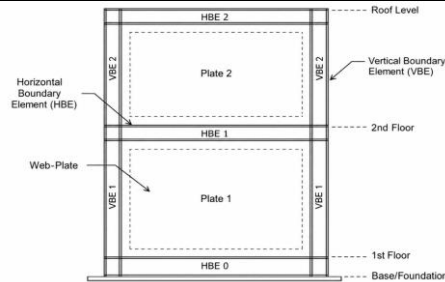
Objek penelitian adalah gedung perkuliahan/pusat pembelajaran dan kegiatan mahasiswa di Kampus ITS Surabaya dengan luas sekitar 23.587 m<sup>2</sup> dan tinggi 56 m. Bangunan terdiri atas 13 lantai, lantai dak, dan atap. Data utama kedua model ditunjukkan pada Tabel 2. Struktur eksisting menggunakan portal momen beton bertulang dengan dinding geser beton setebal 200-300 mm. Pada struktur modifikasi, posisi dinding tetap dipertahankan, sedangkan satu kolom pada area dinding dihilangkan sesuai konfigurasi perencanaan. Panel USPSW menggunakan baja A36 dengan tebal 4,8 mm pada lantai bawah dan 3,8 mm pada lantai atas. Elemen batas vertikal menggunakan kolom CFST HSS 700 x 700 x 25 mm dengan beton isi  $f'_c = 40$  MPa, sedangkan elemen batas horizontal menggunakan profil WF 700 x 300 x 15 x 28 mm. Balok dan pelat pada struktur modifikasi direncanakan sebagai elemen komposit dengan dek baja bergelombang.

Tabel 2. Data Utama Model Struktur

| Parameter                | Model Eksisting RC-SW        | Model Modifikasi USPSW-CFST                 |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|
| Jumlah lantai dan tinggi | 13 lantai + dak + atap, 56 m | 13 lantai + dak + atap, 56 m                |
| Sistem lateral           | Portal momen beton + RC-SW   | Portal momen baja/komposit + USPSW          |
| Elemen dinding           | Beton bertulang 200–300 mm   | Pelat A36, 4,8 mm dan 3,8 mm                |
| Elemen batas vertikal    | Kolom beton bertulang        | CFST HSS 700 × 700 × 25 mm, $f'_c = 40$ MPa |
| Elemen batas horizontal  | Balok beton bertulang        | WF 700 × 300 × 15 × 28 mm                   |



Gambar 1. Denah tipikal model modifikasi dan lokasi panel USPSW pada bay terpilih



Gambar 2. Konfigurasi panel USPSW dengan elemen batas horizontal dan vertikal

## 2.2 Pembebanan, Parameter Gempa, dan Desain Elemen

Pembebanan gravitasi mengacu pada SNI 1727:2020. Beban mati tambahan yang digunakan terdiri atas beban partisi 250 kg/m<sup>2</sup> dan instalasi mekanikal-elektrikal 50 kg/m<sup>2</sup>, sedangkan beban hidup ruang perkuliahan sebesar 250 kg/m<sup>2</sup>. Berdasarkan data tanah, nilai N-SPT rata-rata sebesar 5,67 sehingga lokasi termasuk kelas situs SE. Parameter gempa yang digunakan adalah  $S_s = 0,6785$  g,  $S_1 = 0,3037$  g,  $F_a = 1,3726$ ,  $F_v = 2,7819$ ,  $SDS = 0,621$  g, dan  $SD1 = 0,563$  g. Bangunan menggunakan kategori risiko IV dengan  $I_e = 1,5$  sesuai asumsi pada dokumen perencanaan. Nilai R untuk struktur eksisting sebesar 7,0 dan untuk struktur modifikasi sebesar 7,5, sedangkan Cd kedua model sebesar 5,5 [14]-[17]. Karena nilai R kedua struktur berbeda, nilai gaya geser dasar tidak digunakan untuk menentukan struktur mana yang lebih baik, tetapi tetap ditampilkan sebagai hasil analisis masing-masing model.

Perhitungan panel USPSW mengacu pada SNI 7860:2020 dan AISC Design Guide 20 [9], [10], [17]. Pada panel kritis, tebal yang dibutuhkan dari hasil perhitungan sekitar 4,0 mm dan digunakan pelat 4,8 mm. Sudut medan tarik yang diperoleh sebesar 45,06°. Kolom CFST diperiksa terhadap kelangsingan lokal, gaya tekan, momen, dan interaksi aksial-momen sesuai SNI 1729:2020. Penampang HSS yang digunakan termasuk penampang kompak dan rasio interaksi maksimum pada EBV sebesar 0,91. Pemeriksaan strong-column-weak-beam menghasilkan rasio 2,27. Nilai tersebut digunakan sebagai kontrol desain elemen dan tidak digunakan sebagai parameter perbandingan respons global. Perencanaan pedestal, sloof, pile cap, dan tiang mengacu pada SNI 2847:2019 [14], [23], [25].

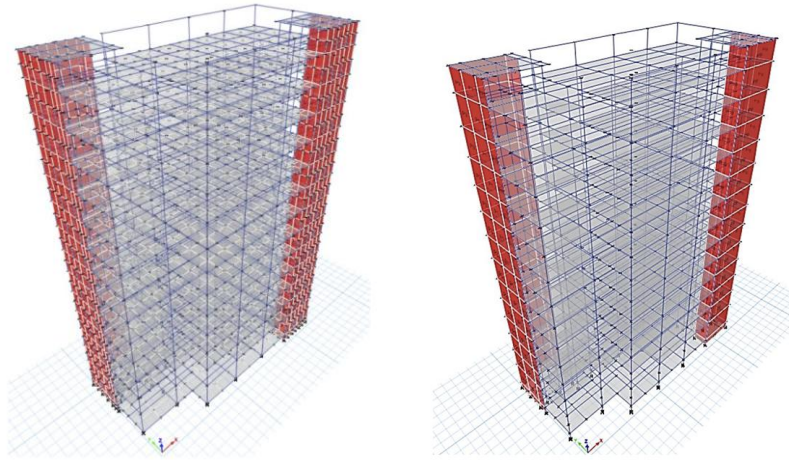
$$\phi V_n = \phi \times 0,42 \times F_y \times t_w \times L_{cf} \times \sin(2\alpha) \quad (1)$$

$$P_{no} = F_y A_s + C_2 f'_c (A_c + A_{sr} E_s / E_c) \quad (2)$$

Persamaan (1) digunakan untuk menghitung kapasitas geser panel USPSW, sedangkan Persamaan (2) digunakan pada perhitungan kapasitas tekan kolom komposit. Perhitungan struktur modifikasi juga mencakup balok komposit, shear connector, sambungan baut dan las, base plate, sambungan panel dengan elemen batas, serta pondasi tiang. Struktur atas dan pondasi dihitung secara terpisah. Reaksi tumpuan dari model gedung digunakan sebagai beban untuk perencanaan pondasi, sehingga pengaruh interaksi tanah-struktur belum diperhitungkan.

## 2.3 Pemodelan dan Tahapan Analisis

Penelitian dilakukan dengan membuat dua model tiga dimensi, yaitu struktur eksisting dan struktur modifikasi. Kedua model menggunakan kombinasi pembebanan yang sama. Tahapan penelitian dimulai dari pengumpulan data gambar, material, dan tanah, kemudian dilanjutkan dengan analisis pembebanan dan pemodelan struktur eksisting. Setelah kontrol dinamis struktur eksisting selesai, dilakukan preliminary design dan pemodelan struktur modifikasi, perhitungan elemen sekunder dan primer, sambungan, serta struktur bawah. Analisis gempa menggunakan metode respons spektrum. Apabila gaya geser dinamik lebih kecil daripada gaya geser statik yang disyaratkan, faktor skala respons spektrum diperbesar sesuai SNI 1726:2019 sampai memenuhi ketentuan.



Gambar 3. Model tiga dimensi: (a) struktur eksisting RC-SW dan (b) struktur modifikasi USPSW-CFST

## 2.4 Metode Perhitungan Pondasi

Pondasi struktur modifikasi direncanakan berdasarkan reaksi tumpuan dari struktur atas. Tiang yang digunakan adalah spun pile berdiameter 600 mm dengan panjang 36 m. Daya dukung tiang dihitung menggunakan pendekatan Nakazawa untuk kondisi tanah lunak. Jumlah tiang ditentukan dari beban yang bekerja dan daya dukung izin satu tiang. Distribusi beban pada kelompok tiang dihitung dengan menganggap pile cap kaku. Efisiensi kelompok dihitung menggunakan persamaan Converse-Labarre, sedangkan beban maksimum tiap tiang dihitung dari gaya aksial dan momen dua arah. Pemeriksaan pondasi meliputi kapasitas aksial dan momen tiang, perpindahan kepala tiang, jarak antartiang, efisiensi kelompok, dan geser pons pile cap sesuai SNI 2847:2019 [25].

$$n_p = P / P_{all} \quad (3)$$

$$\eta = 1 - \arctan(D/S) \times \{[(m-1)n + (n-1)m] / (90mn)\} \quad (4)$$

$$P_{max} = P_u / n_p \pm M_y x_{max} / (n_p \sum x^2) \pm M_x y_{max} / (n_p \sum y^2) \quad (5)$$

$$\phi V \geq V_u \quad (6)$$

Pada Persamaan (3)-(6),  $n_p$  adalah jumlah tiang,  $P_{all}$  adalah daya dukung izin satu tiang,  $\eta$  adalah efisiensi kelompok,  $D$  adalah diameter tiang,  $S$  adalah jarak antartiang,  $m$  dan  $n$  adalah jumlah baris dan kolom, sedangkan  $P_{max}$  adalah beban maksimum pada satu tiang. Pondasi eksisting tidak dihitung ulang dengan cara yang sama. Oleh karena itu, perbandingan kapasitas pondasi antara struktur eksisting dan modifikasi tidak dilakukan secara langsung. Pembahasan struktur bawah difokuskan pada hasil perencanaan pondasi struktur modifikasi dan perubahan biaya material.

## 2.5 Parameter Evaluasi

Parameter yang digunakan untuk membandingkan kedua struktur adalah partisipasi massa, periode fundamental, gaya geser dasar setelah penskalaan, simpangan antar lantai, koefisien stabilitas P-Delta, pembagian base shear antara dinding dan rangka, ketidakberaturan struktur, berat model, kapasitas elemen dan pondasi, hasil model tanpa shear wall, serta biaya material. Simpangan desain dihitung dari perpindahan elastik yang diperbesar dengan  $C_d/I_e$  sesuai SNI 1726:2019. Partisipasi massa harus mencapai sedikitnya 90%, simpangan diperiksa terhadap batas  $0,01h_{sx}$ , dan koefisien stabilitas dibandingkan dengan  $\theta_{maks} = 0,0909$ . Biaya yang dihitung hanya biaya material struktur atas dan bawah. Upah, alat, fabrikasi, transportasi, proteksi kebakaran dan korosi, overhead, waktu pelaksanaan, serta biaya siklus hidup tidak termasuk dalam perhitungan.

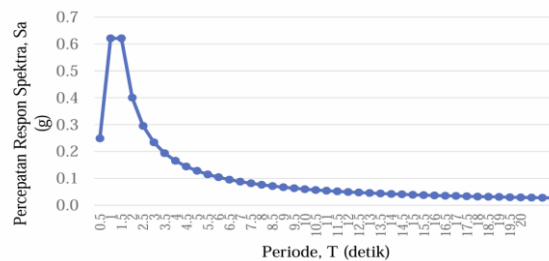
## 2.6 Strategi Verifikasi Internal dan Benchmark

Hasil analisis diperiksa melalui beberapa tahapan. Pertama, hasil model dicek terhadap ketentuan partisipasi massa, periode, gaya geser dasar, simpangan, P-Delta, dan ketidakberaturan. Kedua, gaya dalam dari model digunakan untuk memeriksa kapasitas panel USPSW, EBH, EBV, sambungan, dan pondasi secara manual. Ketiga, dibuat model modifikasi tanpa shear wall untuk melihat pengaruh dinding terhadap simpangan, serta dilakukan pemeriksaan bentuk moda translasi. Hasil yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan beberapa penelitian SPSW-CFST sebelumnya [26]-[30]. Pemeriksaan ini digunakan sebagai verifikasi internal, karena penelitian tidak melakukan kalibrasi langsung terhadap hasil eksperimen atau perangkat lunak lain. Pemeriksaan silang antara hasil pemodelan dan perhitungan elemen juga digunakan pada penelitian modifikasi struktur lainnya [34].

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Partisipasi Massa dan Periode Fundamental

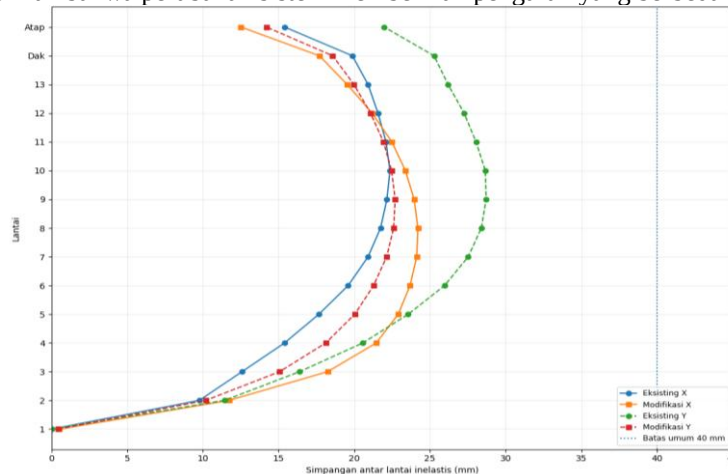
Hasil analisis modal menunjukkan bahwa pada mode ke-250, partisipasi massa kumulatif struktur eksisting mencapai 99,93% arah X dan 99,98% arah Y. Pada struktur modifikasi diperoleh 99,60% arah X dan 99,63% arah Y. Nilai tersebut sudah melebihi batas minimum 90%. Periode fundamental struktur eksisting sebesar 1,76 s, sedangkan struktur modifikasi sebesar 1,61 s. Artinya, periode struktur berkurang sekitar 8,5% setelah dilakukan modifikasi. Berat model juga turun dari 11,409 juta kg menjadi 8,197 juta kg atau berkurang 28,15%. Perubahan periode tersebut dipengaruhi oleh perubahan massa dan kekakuan struktur. Karena periode hasil analisis kedua model lebih besar dari batas 1,40 s yang digunakan dalam penentuan gaya gempa, periode desain dibatasi sebesar 1,40 s sesuai ketentuan yang digunakan.



Gambar 4. Spektrum respons desain situs SE berdasarkan parameter gempa SNI 1726:2019

#### 3.2 Simpangan Antar Lantai

Hasil kontrol simpangan menunjukkan bahwa nilai maksimum pada arah X struktur eksisting sebesar 22,36 mm dan pada struktur modifikasi sebesar 24,21 mm. Dengan demikian, simpangan arah X meningkat sekitar 8,3%. Pada arah Y, simpangan maksimum turun dari 28,71 mm menjadi 22,71 mm atau berkurang sekitar 20,9%. Seluruh nilai masih berada di bawah batas izin, yaitu 40 mm pada lantai tipikal, 30 mm pada atap, dan 50 mm pada lantai pertama. Jika dibandingkan dengan batas 40 mm pada lantai tipikal, nilai maksimum struktur eksisting menggunakan sekitar 55,9% batas pada arah X dan 71,8% pada arah Y. Pada struktur modifikasi nilainya menjadi 60,5% pada arah X dan 56,8% pada arah Y. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan sistem memberikan pengaruh yang berbeda pada kedua arah bangunan.



Gambar 5. Profil simpangan antar lantai desain arah X dan Y pada model eksisting dan modifikasi

Tabel 3. Simpangan Antar Lantai Desain pada Lantai Terpilih (mm)

| Lantai | Eks-X | Eks-Y | Mod-X | Mod-Y | Batas |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Atap   | 15,40 | 21,98 | 12,53 | 14,20 | 30    |
| Dak    | 19,88 | 25,28 | 17,70 | 18,58 | 40    |
| 13     | 20,92 | 26,20 | 19,54 | 19,99 | 40    |
| 11     | 22,10 | 28,05 | 22,49 | 21,94 | 40    |

| Lantai | Eks-X | Eks-Y | Mod-X | Mod-Y | Batas |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10     | 22,36 | 28,66 | 23,38 | 22,47 | 40    |
| 9      | 22,16 | 28,71 | 23,96 | 22,71 | 40    |
| 8      | 21,74 | 28,40 | 24,21 | 22,61 | 40    |
| 1      | 0,00  | 0,00  | 0,52  | 0,44  | 50    |

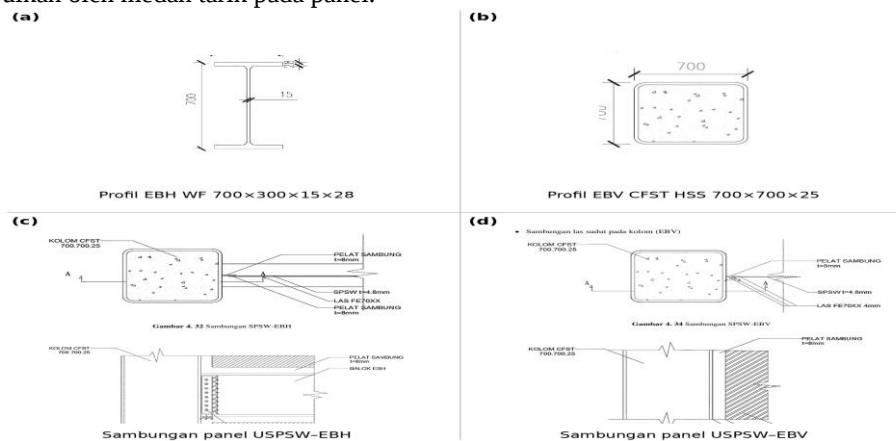
Berdasarkan Tabel 3, simpangan maksimum arah X pada struktur eksisting terjadi di lantai 10, sedangkan pada struktur modifikasi terjadi di lantai 8. Pada arah Y, simpangan maksimum kedua model terjadi di sekitar lantai 9 dan nilai struktur modifikasi lebih kecil. Dari hasil pembagian base shear, dinding pada struktur eksisting memikul sekitar 51% pada arah X dan 42% pada arah Y. Pada struktur modifikasi, nilainya meningkat menjadi 70% pada arah X dan 88% pada arah Y. Peningkatan kontribusi dinding pada arah Y sejalan dengan turunnya simpangan maksimum arah Y sebesar 20,9%. Pada arah X, simpangan tetap meningkat walaupun kontribusi dinding bertambah. Hal ini menunjukkan bahwa simpangan tidak hanya dipengaruhi oleh dinding, tetapi juga oleh perubahan massa, kekakuan, dan susunan elemen pada keseluruhan struktur. Persentase base shear tersebut hanya menunjukkan pembagian gaya pada model dan tidak langsung digunakan untuk menyatakan pemenuhan kapasitas minimum rangka 25%.

### 3.3 Perhitungan dan Verifikasi USPSW

Perhitungan USPSW ditinjau pada panel kritis pier 4 lantai 3. Panel menggunakan baja A36 dengan  $F_y = 2482,2$  kgf/cm<sup>2</sup>, panjang panel 7,20 m, panjang bersih antar elemen batas vertikal 6,50 m, dan gaya geser terfaktor 210.000 kgf atau sekitar 2.059,4 kN. Berdasarkan Persamaan (1), tebal panel yang dibutuhkan sebesar 4,0 mm. Dalam perencanaan digunakan pelat 4,8 mm pada lantai 1-8 dan pelat 3,8 mm pada lantai 9-13 sesuai besarnya gaya yang bekerja.

Untuk pelat 4,8 mm diperoleh sudut medan tarik sebesar 45,06°, masih berada dalam rentang 30°-55°. Kapasitas geser desain panel sebesar 292.740 kgf atau sekitar 2.870,8 kN, lebih besar daripada gaya geser yang bekerja sebesar 2.059,4 kN. Rasio kebutuhan terhadap kapasitas panel adalah 0,72 sehingga panel memenuhi. Gaya dari medan tarik panel selanjutnya diteruskan ke elemen batas horizontal (EBH) dan elemen batas vertikal (EBV), sehingga kedua elemen tersebut juga diperiksa terhadap gaya aksial, momen, dan geser [9], [17].

Penampang EBH dan EBV serta detail sambungan panel ditunjukkan pada Gambar 6. Panel USPSW dihubungkan dengan pelat sambung setebal 8 mm. Kebutuhan las pada sambungan USPSW ke EBH dan EBV dihitung berdasarkan gaya yang ditimbulkan oleh medan tarik pada panel.



Gambar 6. Penampang dan detail sambungan USPSW: (a) EBH WF, (b) EBV CFST, (c) sambungan USPSW-EBH, dan (d) sambungan USPSW-EBV

Tabel 4. Ringkasan Perhitungan Panel USPSW dan Elemen Batas pada Panel Kritis

| Pemeriksaan       | Kebutuhan             | Kapasitas/hasil desain  | Evaluasi                     |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------|
| Tebal panel       | $t_{w, req} = 4,0$ mm | $t_{pakai} = 4,8$ mm    | Cadangan tebal 20%, memenuhi |
| Sudut medan tarik | Rentang 30°–55°       | $\alpha = 45,06^\circ$  | Berada dalam rentang         |
| Geser panel USPSW | $V_u = 2.059,4$ kN    | $\phi V_n = 2.870,8$ kN | $D/C = 0,72 < 1,00$          |

| Pemeriksaan                | Kebutuhan                                                                                  | Kapasitas/hasil desain                                                                                    | Evaluasi                  |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| EBH WF<br>700×300×15×28    | $P_u/M_u/V_u = 3.043,7 \text{ kN} / 202,1 \text{ kN}\cdot\text{m} / 571,3 \text{ kN}$      | $\phi P_n/\phi M_n/\phi V_n = 4.656,2 \text{ kN} / 1.608,9 \text{ kN}\cdot\text{m} / 1.551,1 \text{ kN}$  | Rasio P-M = $0,77 < 1,00$ |
| EBV CFST HSS<br>700×700×25 | $P_u/M_u/V_u = 15.387,4 \text{ kN} / 1.170,4 \text{ kN}\cdot\text{m} / 1.694,5 \text{ kN}$ | $\phi P_n/\phi M_n/\phi V_n = 27.825,0 \text{ kN} / 2.990,4 \text{ kN}\cdot\text{m} / 5.111,8 \text{ kN}$ | Rasio P-M = $0,91 < 1,00$ |

Berdasarkan Tabel 4, panel USPSW, EBH, dan EBV pada lokasi kritis memenuhi hasil pemeriksaan. Rasio kebutuhan-kapasitas panel sebesar 0,72, rasio interaksi EBH sebesar 0,77, dan rasio interaksi EBV sebesar 0,91. Nilai terbesar terdapat pada EBV CFST sehingga elemen ini paling dekat dengan batas kapasitas. Kondisi tersebut dapat terjadi karena gaya tarik diagonal pada panel diteruskan ke elemen batas sebagai tambahan gaya aksial, momen, dan geser. Hasil penelitian lain juga menunjukkan bahwa kekakuan kolom batas dan detail sambungan memengaruhi perilaku panel dan rangka [8], [18], [27], [29]. Oleh karena itu, penambahan tebal pelat harus tetap diikuti pemeriksaan EBV. Pada penelitian ini, pemeriksaan masih berupa capacity design pada elemen terpilih, sedangkan perilaku pascatekuk dan urutan pelelehan belum dianalisis secara nonlinier.

### 3.4 Perhitungan Pondasi Modifikasi

Pondasi struktur modifikasi menggunakan spun pile D600 mm sepanjang 36 m dengan kuat tekan beton 52 MPa. Pile cap PC1 menggunakan empat tiang dengan jarak 1,80 m dan dimensi 3,50 x 3,50 x 1,60 m. Pada area dinding digunakan pile cap PC2 dengan ukuran 10,00 x 10,00 m dan jarak antartiang 2,00 m. Hasil perhitungan efisiensi kelompok sebesar 0,99 untuk PC1 dan 1,00 untuk PC2. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pengaruh pengurangan kapasitas akibat kelompok tiang relatif kecil pada konfigurasi yang digunakan.

Tabel 5. Ringkasan Perhitungan Pondasi Modifikasi

| Pemeriksaan              | Hasil perhitungan                                                                                             | Batas/kapasitas                        | Evaluasi                                 |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| Geometri tiang           | $D = 600 \text{ mm}; L = 36 \text{ m}; f'_c = 52 \text{ MPa}$                                                 | <i>Spun pile</i> prategang D600        | Geometri digunakan pada model modifikasi |
| Konfigurasi PC1          | 4 tiang; $S = 1,80 \text{ m}; 3,50 \times 3,50 \times 1,60 \text{ m}$                                         | $S = 3D-3,5D$                          | Jarak dan dimensi memenuhi               |
| Konfigurasi PC2          | <i>Pile cap</i> $10,00 \times 10,00 \text{ m}; S = 2,00 \text{ m}$ ; jumlah tiang mengikuti denah perencanaan | $S = 3D-3,5D$                          | Jarak antartiang memenuhi                |
| Reaksi rencana PC1       | 1.358,9 kN normal; 2.035,3 kN gempa                                                                           | 3.360 kN normal; 4.200 kN gempa        | Rasio 0,40 dan 0,48                      |
| Reaksi rencana PC2       | 1.073,6 kN normal; 1.847,1 kN gempa                                                                           | 3.360 kN normal; 4.200 kN gempa        | Rasio 0,32 dan 0,44                      |
| Kapasitas satu tiang     | $P_{max} = 203,5 \text{ ton}; M = 14,632 \text{ ton}\cdot\text{m}$                                            | 249 ton; $19 \text{ ton}\cdot\text{m}$ | Rasio 0,82 dan 0,77                      |
| Efisiensi kelompok       | $\eta \text{ PC1} = 0,99; \eta \text{ PC2} = 1,00$                                                            | $\eta \leq 1,00$                       | Pengaruh kelompok kecil                  |
| Perpindahan kepala tiang | $U_x = 8,896 \text{ mm}; U_y = 8,819 \text{ mm}; U_z = 2,057 \text{ mm}$                                      | Lateral $\leq 25 \text{ mm}$           | Pemanfaatan lateral $\pm 35\%$           |
| Geser pons PC1           | $V_u = 4.649,6 \text{ kN}$                                                                                    | $\phi V_c = 11.769 \text{ kN}$         | $D/C = 0,40 < 1,00$                      |

Berdasarkan Tabel 5, reaksi rencana pada PC1 dan PC2 masih lebih kecil daripada kapasitas yang digunakan dalam perencanaan. Kapasitas aksial dan momen satu tiang juga memenuhi, sedangkan perpindahan kepala tiang arah X dan Y kurang dari 9 mm. Kontrol geser pons pada PC1 menghasilkan rasio kebutuhan-kapasitas sekitar 0,40. Walaupun berat struktur atas berkurang 28,15%, biaya material struktur bawah hanya berkurang 7,51%. Hal ini terjadi karena jumlah dan dimensi pondasi tidak hanya dipengaruhi oleh berat struktur, tetapi juga oleh gaya aksial dan momen, jarak antartiang, efisiensi kelompok, dimensi pile cap, serta kapasitas tanah. Oleh karena itu, pengurangan berat struktur atas tidak selalu menghasilkan pengurangan biaya pondasi dengan persentase yang sama. Pondasi modifikasi juga tidak dapat langsung

dinyatakan lebih aman daripada pondasi eksisting karena pondasi eksisting tidak dihitung ulang dengan prosedur yang sama.

### 3.5 Biaya Material

Rencana Anggaran Biaya pada penelitian ini hanya memperhitungkan biaya material. Biaya material struktur eksisting sebesar Rp37.010.729.000,28, terdiri atas struktur bawah Rp11.007.559.057,10 dan struktur atas Rp26.003.169.943,18. Pada struktur modifikasi, biaya material sebesar Rp96.241.390.837,83, terdiri atas struktur bawah Rp10.180.825.669,70 dan struktur atas Rp86.060.565.168,14. Biaya struktur bawah turun 7,51%, sedangkan biaya struktur atas naik 230,96%. Secara keseluruhan, biaya material struktur modifikasi meningkat 160,04% atau sekitar 2,60 kali biaya struktur eksisting. Biaya terbesar pada struktur modifikasi berasal dari kolom CFST, yaitu sekitar Rp48,70 miliar atau 50,6% dari total biaya. Perhitungan ini belum memasukkan upah, alat, fabrikasi, erection, transportasi, proteksi kebakaran dan korosi, overhead, waktu pelaksanaan, dan biaya siklus hidup. Penelitian mengenai metode konstruksi gedung tinggi juga menunjukkan bahwa metode pelaksanaan dapat memengaruhi waktu dan biaya [33].

### 3.6 Perbandingan Performa Struktur

Perbandingan hasil struktur eksisting dan struktur modifikasi dirangkum pada Tabel 6. Parameter yang dibandingkan meliputi partisipasi massa, periode fundamental, gaya geser dasar, simpangan, P-Delta, berat struktur, biaya, pembagian base shear, dan hasil model tanpa shear wall. Gaya geser dasar tetap dicantumkan sebagai hasil analisis, tetapi tidak digunakan untuk menentukan struktur yang lebih baik karena kedua model menggunakan nilai R dan faktor skala yang berbeda.

Tabel 6. Perbandingan Performa Struktur Eksisting dan Modifikasi

| Indikator                          | RC-SW            | USPSW-CFST       | Perubahan/Interpretasi                                                                                      |
|------------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Partisipasi massa akhir (mode 250) | 99,93% / 99,98%  | 99,60% / 99,63%  | $\Delta X = -0,33$ poin; $\Delta Y = -0,35$ poin; keduanya $> 90\%$                                         |
| Periode fundamental                | 1,76 s           | 1,61 s           | Turun 8,5%; frekuensi naik 9,3%                                                                             |
| Gaya geser dasar X/Y               | 1.963 / 1.040 kN | 6.612 / 5.617 kN | Naik $\pm 237\%$ / $\pm 440\%$ ; tidak dibandingkan langsung karena R/skala berbeda                         |
| Drift maks. X/Y                    | 22,36 / 28,71 mm | 24,21 / 22,71 mm | X naik 8,3%; Y turun 20,9%; utilisasi mod. 60,5% / 56,8%                                                    |
| Koefisien stabilitas $\theta$ X/Y  | 0,0056 / 0,0090  | 0,0094 / 0,0182  | Meningkat; $\theta$ mod-Y = 20,0% dari batas 0,0909                                                         |
| Keluaran berat model               | 11,409 juta kg   | 8,197 juta kg    | Turun 28,15%                                                                                                |
| Biaya struktur bawah               | Rp11,008 miliar  | Rp10,181 miliar  | Turun 7,51%                                                                                                 |
| Biaya material total               | Rp37,011 miliar  | Rp96,241 miliar  | Naik 160,04%; menjadi 2,60 kali                                                                             |
| Distribusi base shear dinding X/Y  | 51% / 42%        | 70% / 88%        | Porsi dinding meningkat, terutama arah Y; merupakan load sharing, bukan bukti langsung kapasitas rangka 25% |
| Sensitivitas tanpa shear wall      | -                | 64,34 / 54,59 mm | Model modifikasi tanpa dinding melampaui batas pada beberapa lantai; dengan USPSW maksimum 24,21 / 22,71 mm |

Dari Tabel 6 dapat dilihat bahwa periode fundamental struktur modifikasi turun 8,5% dan frekuensi fundamental naik sekitar 9,3%. Berat struktur juga berkurang 28,15%. Pada arah Y, simpangan maksimum turun 20,9%, sedangkan pada arah X meningkat 8,3%, tetapi seluruhnya masih memenuhi batas. Kontribusi base shear dinding berubah dari 51%/42% pada struktur eksisting menjadi 70%/88% pada struktur modifikasi untuk arah X/Y. Nilai koefisien stabilitas terbesar pada struktur modifikasi adalah 0,0182 pada arah Y dan masih lebih kecil daripada batas 0,0909. Dari sisi biaya, pengurangan berat struktur 28,15% hanya diikuti penurunan biaya struktur bawah 7,51%, sedangkan biaya material total meningkat 160,04%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan USPSW-CFST memberikan beberapa keuntungan pada berat struktur dan simpangan arah Y, tetapi tidak membuat seluruh parameter menjadi lebih baik.

### 3.7 Verifikasi Internal dan Tinjauan Sensitivitas

Sebagai kontrol tambahan, dibuat model struktur modifikasi tanpa shear wall. Hasil analisis menunjukkan simpangan maksimum sebesar 64,343 mm pada arah X dan 54,593 mm pada arah Y. Beberapa lantai tidak memenuhi batas simpangan 40 mm. Setelah USPSW dipasang, simpangan maksimum turun menjadi 24,211 mm pada arah X dan 22,710 mm pada arah Y. Jika dibandingkan dengan model tanpa dinding, penurunan simpangan maksimum sekitar 62,4% pada arah X dan 58,4% pada arah Y. Hasil ini menunjukkan bahwa dinding memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap pengendalian simpangan pada model modifikasi. Pemeriksaan ini digunakan sebagai kontrol internal dan bukan sebagai validasi eksperimental.

Kontrol lain yang dilakukan meliputi penskalaan respons spektrum sampai gaya geser dinamik memenuhi ketentuan, pemeriksaan P-Delta dan ketidakberaturan, kontrol kapasitas panel, EBH, EBV, dan pondasi, serta pemeriksaan bentuk translasi mode 1-3 pada kedua model. Dari hasil pemeriksaan elemen, EBV CFST mempunyai rasio interaksi terbesar sebesar 0,91. Nilai ini menunjukkan bahwa EBV merupakan elemen yang paling dekat dengan batas kapasitas pada panel kritis. Karena penelitian tidak menggunakan data eksperimen yang sama maupun perbandingan dengan perangkat lunak lain, hasil pada bagian ini dinyatakan sebagai verifikasi internal dan sensitivity check.

### 3.8 Implikasi, Keterbatasan, dan Arah Penelitian Lanjutan

Analisis dalam penelitian ini masih menggunakan respons spektrum elastik dan pemeriksaan kapasitas pada elemen terpilih. Model tanpa shear wall digunakan untuk melihat pengaruh dinding terhadap simpangan, tetapi belum dapat menggantikan validasi terhadap hasil eksperimen atau perangkat lunak lain. Perilaku pascatekuk panel, urutan pelelehan, degradasi akibat beban berulang, residual drift, fleksibilitas sambungan, dan interaksi tanah-struktur belum dimodelkan. Untuk penelitian selanjutnya, model panel dapat dikembangkan menggunakan analisis nonlinier, dilengkapi pemeriksaan mesh dan kekakuan sambungan, serta dianalisis dengan pushover atau nonlinear time-history analysis [26]-[30]. Perbandingan hasil dengan perangkat lunak lain juga dapat dilakukan untuk menambah verifikasi model.

Perbandingan biaya pada penelitian ini juga masih terbatas pada biaya material. Biaya upah, alat, fabrikasi, erection, transportasi, proteksi kebakaran dan korosi, waktu pelaksanaan, pemeliharaan, serta biaya siklus hidup belum dihitung. Pondasi eksisting juga tidak dihitung ulang dengan metode yang sama, sehingga hasil struktur bawah belum dapat dibandingkan secara langsung. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan awal dalam memilih sistem struktur, tetapi belum dapat digunakan untuk menyatakan bahwa USPSW-CFST lebih ekonomis atau lebih baik untuk seluruh kondisi. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan optimasi penampang, interaksi tanah-struktur, analisis nonlinier, dan perhitungan biaya siklus hidup.

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, struktur modifikasi USPSW-CFST pada gedung perkuliahan 13 lantai menghasilkan beberapa perubahan dibandingkan struktur eksisting RC-SW. Berat struktur turun dari 11.408.916,08 kg menjadi 8.196.840,57 kg atau berkurang 28,15%, sedangkan periode fundamental turun dari 1,76 s menjadi 1,61 s. Simpangan maksimum arah Y berkurang 20,9%, sedangkan arah X meningkat 8,3%, tetapi seluruh simpangan masih memenuhi batas izin. Kontribusi base shear dinding meningkat dari 51%/42% menjadi 70%/88% pada arah X/Y. Pada kontrol model tanpa shear wall, simpangan maksimum mencapai 64,34 mm pada arah X dan 54,59 mm pada arah Y, kemudian turun menjadi 24,21 mm dan 22,71 mm setelah USPSW digunakan. Panel kritis menggunakan pelat 4,8 mm dengan rasio kebutuhan-kapasitas 0,72, sedangkan rasio interaksi EBH dan EBV masing-masing 0,77 dan 0,91. Pondasi modifikasi menggunakan spun pile D600 mm sepanjang 36 m dan memenuhi kontrol aksial, momen, perpindahan kepala tiang, efisiensi kelompok, serta geser pons yang ditinjau. Biaya material struktur bawah turun 7,51%, tetapi biaya material total meningkat 160,04% dari Rp37,01 miliar menjadi Rp96,24 miliar. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa USPSW-CFST mampu mengurangi berat struktur dan simpangan arah Y, tetapi belum memberikan keuntungan pada seluruh parameter, khususnya biaya material. Analisis lanjutan masih diperlukan untuk meninjau perilaku nonlinier, sambungan, interaksi tanah-struktur, dan biaya siklus hidup.

## REFERENCES

- [1] Y. Liu, J. S. Kuang, Q. Huang, Z. Gu, and X. Wang, "Spectrum-based pushover analysis for the quick seismic demand estimation of reinforced concrete shear walls," *Structures*, vol. 27, pp. 1490–1500, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.07.040.
- [2] B. Octavianus, M. S. Wallah, and S. O. Dapas, "Studi perbandingan respons dinamik bangunan bertingkat banyak dengan variasi tata letak dinding geser," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 3, pp. 435–446, 2019.

- [3] A. C. Aydin and B. Bayrak, "Design and performance parameters of shear walls: A review," *Architecture, Civil Engineering, Environment*, vol. 14, no. 4, pp. 69–94, 2021, doi: 10.21307/ACEE-2021-032.
- [4] T. Zirakian and J. Zhang, "Structural performance of unstiffened low yield point steel plate shear walls," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 112, pp. 40–53, 2015.
- [5] I. F. Seilie and J. D. Hooper, "Steel plate shear walls: Practical design and construction," *Modern Steel Construction*, vol. 45, no. 4, pp. 37–43, 2005.
- [6] Canadian Consulting Engineer, "Steel plate shear walls: Innovative structural system for seismic regions," 2014.
- [7] L. J. Thorburn, G. L. Kulak, and C. J. Montgomery, *Analysis of Steel Plate Shear Walls*, Structural Engineering Report No. 107. Edmonton: University of Alberta, 1983.
- [8] J.-K. Tan, X.-H. Zhou, H. Su, Y.-H. Wang, T. Zhou, and K. Wang, "Interaction behaviour of buckling-restrained steel plate shear wall and boundary composite frame," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 191, 107189, 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107189.
- [9] R. Sabelli and M. Bruneau, *Steel Plate Shear Walls*, AISC Design Guide 20. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2007.
- [10] Y. Fu and M. Bruneau, "Complementary evaluation of diagonal tension field inclination angle in steel plate shear walls," *Engineering Journal*, vol. 56, no. 1, pp. 47–61, 2019.
- [11] M. Wang, Y. Shi, J. Xu, W. Yang, and Y. Li, "Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 112, pp. 373–386, 2015, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.05.002.
- [12] H.-C. Guo, J.-P. Hao, and Y.-H. Liu, "Behavior of stiffened and unstiffened steel plate shear walls considering joint properties," *Thin-Walled Structures*, vol. 97, pp. 53–62, 2015, doi: 10.1016/j.tws.2015.09.005.
- [13] M.-X. Xiong, P.-W. Pi, and Y.-L. Long, "Continuity of seismic performance of concrete-filled steel tubular columns across strength sequence variation from NSC through HSC to UHSC," *Structures*, vol. 81, 110260, 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.110260.
- [14] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta: BSN, 2020.
- [15] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Jakarta: BSN, 2019.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: BSN, 2020.
- [17] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 7860:2020 Ketentuan Seismik untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta: BSN, 2020.
- [18] Z. Chen, M. Amer, Y. Du, W. A. H. Mashrah, B. Zhao, and J. Huang, "Experimental and numerical study on seismic performance of square and L-shaped concrete-filled steel tubes column frame-buckling steel plate shear walls," *Engineering Structures*, vol. 274, 115155, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115155.
- [19] W. Abdul Ghafar, Z. Tao, Y. Tao, Y. He, L. Wu, and Z. Zhang, "Seismic performance investigation of an innovative steel plate shear wall system," *Frontiers in Materials*, vol. 9, 1075300, 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.1075300.
- [20] Y. Du, C. Shi, Z. Zhao, Y. Zhang, and T. Li, "Degradation of seismic performance of thin steel plate shear walls under multiple earthquakes," *Buildings*, vol. 14, no. 4, 888, 2024, doi: 10.3390/buildings14040888.
- [21] I. R. Hariyanto, B. Suswanto, and A. B. Habieb, "Analisis Numerik Vertical Shear Link (VSL) secara Sub-Assemblage menggunakan Program Bantu ABAQUS," *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, vol. 20, no. 3, pp. 333–342, Aug. 2022.
- [22] I. R. Hariyanto, B. Suswanto, A. B. Habieb, and I. G. P. Raka, "Studi analisis perkuatan struktur gedung 5 lantai di Surabaya akibat beban dinamis menggunakan shearwall," *Jurnal Bangunan: Teori, Praktik, Penelitian, dan Pengajaran Teknik Bangunan*, vol. 30, no. 2, pp. 153–168, Oct. 2025, doi: 10.17977/um071v30i22025p153-168.
- [23] A. N. Abdullah, B. Budiono, H. D. Setio, and E. Lim, "Seismic behavior of concrete-filled steel tube (CFST) column and reinforced concrete beam connections under reversed cyclic loading," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 53, no. 3, 2021, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.3.1.
- [24] A. Astaneh-Asl, "Steel plate shear walls," in *U.S.-Japan Workshop on Seismic Fracture Issues in Steel Structures*, 2000, pp. 1–12.
- [25] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: BSN, 2019.
- [26] A. Verma and D. R. Sahoo, "Influence of composite floor slab on seismic performance of steel plate shear walls," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 188, 107042, 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2021.107042.

- [27] M. Amer, Y. Du, Z. Chen, S. A. Laqsum, and Y. Zhang, "Seismic behavior of concrete-filled steel tubes column frame-buckling restrained steel plate shear walls connected with bolt/weld," *Thin-Walled Structures*, vol. 189, 110911, 2023, doi: 10.1016/j.tws.2023.110911.
- [28] A. Gorji Azandariani, M. Gholhaki, and M. Gorji Azandariani, "Assessment of damage index and seismic performance of steel plate shear wall (SPSW) system," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 191, 107157, 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107157.
- [29] G.-J. Wang, S.-Y. Jiang, Q.-S. Hou, L.-M. Zhu, and C.-Y. Tian, "Seismic behavior of composite shear walls with boundary columns using rectangular and U-shaped concrete-filled steel tubes," *Journal of Building Engineering*, vol. 73, 106530, 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106530.
- [30] S. Jin, H. Du, and J. Bai, "Seismic performance assessment of steel frame structures equipped with buckling-restrained slotted steel plate shear walls," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 182, 106699, 2021, doi: 10.1016/j.jcsr.2021.106699.
- [31] I. R. Hariyanto, "Modifikasi Perencanaan Struktur Rich Palace Surabaya dengan Baja Beton Komposit dan Pengaku Eksentris Tipe X Dua Lantai," thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2021.
- [32] I. R. Hariyanto, "Studi Pemodelan Perilaku Vertical Shear Link (VSL) pada Eccentrically Braced Frames dengan Metode Elemen Hingga," M.S. thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2022.
- [33] I. R. Hariyanto, R. Purnamasari, A. Y. Zuhdy, Y. N. Wibowo, K. Yudoprasetyo, et al., "Time and Cost Efficiency Comparison of Conventional and Half-Slab Methods in High-Rise Building Construction," *IPTEK The Journal of Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 78–93, 2026.
- [34] K. Yudoprasetyo, M. S. Darmawan, I. R. Hariyanto, and R. A. Rahman, "Modifikasi Jembatan Jurug-B dengan Box Girder Beton Prategang Balanced Cantilever," *Composite: Journal of Civil Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 41–52, 2026, doi: 10.26905/cjce.v5i1.17264.