

EFEK TORSI BANGUNAN TERHADAP RESPON STRUKTUR PADA SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS DAN SISTEM GANDA

THE EFFECT OF BUILDING TORSION ON STRUCTURAL RESPONSE ON SPECIAL MOMENT RESISTING FRAME SYSTEM AND DUAL SYSTEM

Suci Fadhilah Ramadhani¹, Jonathan Saputra², Anis Rosyidah*³

*Email: anis.rosyidah@sipil.pnj.ac.id

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta, Jln. Prof. GA. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

Abstrak— Dalam penelitian ini dilakukan analisis pengaruh ketidakberaturan torsi terhadap struktur dengan menggunakan metode *Force Based Design* sebagai perencanaan gaya gempa. Penelitian dilakukan pada bangunan tidak beraturan tipe diskontinuitas diafragma pada lantai 3. Pemodelan pertama menggunakan struktur sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) kemudian pemodelan kedua menggunakan struktur sistem ganda (dinding geser dan SRPMK). Hasil penelitian diperoleh gaya geser dasar gempa pada bangunan dengan struktur sistem ganda lebih besar 47% dibandingkan dengan struktur SRPMK. Pada kedua model bangunan, adanya opening plat lantai yang lebih dari 50% di lantai 3 mempengaruhi kekakuan kolom di lantai 4, sehingga simpangan di lantai 4 lebih besar daripada lantai lainnya. Adanya ketidakberaturan torsi mempengaruhi gaya dalam yang terjadi. Dari hasil uji *independent T* dan *Mann Whitney U* yang dilakukan pada gaya dalam balok dan kolom didapat bahwa tidak ada pengaruh yang signifikan setelah penggunaan struktur sistem ganda.

Kata kunci — *Diskontinuitas diafragma, Sistem ganda, Respon struktur, Ketidakberaturan torsi*

Abstract— In this research, analyzed torsional irregularity influence on structures using force based design method for designing a seismic force. This research was conducted in an irregular building with diaphragm discontinuity on the 3rd floor. The first model of structure uses a special moment resisting frame (SMRF) and the second one uses a dual system (shear wall and SMRF). The result showed that the seismic base shear force on the dual system has a 47% larger value than the SMRF structure. On both models, the presence of an opened floor plan more than 50% on the third floor affected the fourth floor's stiffness's stiffness, thus drifting on the fourth floor larger than any floors. The presence of torsional irregularity affected on occurred inner forces. Based on the independent T-test and Mann Whitney U test results on the beam's and column's inner forces, there is no significant effect after using a double system.

Keywords — *Diaphragm discontinuity, Dual system, Structure response, Torsional irregularity*

I. PENDAHULUAN

Struktur bangunan gedung diklasifikasikan menjadi gedung beraturan dan gedung tidak beraturan. Klasifikasi tersebut berdasarkan pada konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur bangunan gedung. Contoh bangunan dengan tipe ketidakberaturan struktur vertikal yaitu ketidakberaturan tingkat lunak (*soft story*) dan diskontinuitas diafragma sedangkan untuk tipe ketidakberaturan horizontal yaitu ketidakberaturan torsi [1].

Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma terjadi apabila terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50% daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya [1].

Bangunan tidak beraturan tingkat lunak dipengaruhi oleh kekakuan lateral. Kekakuan lateral dari suatu tingkat dapat dipengaruhi oleh tinggi tingkat yang tidak seragam. Ketidakberaturan tingkat lunak dapat memicu terjadinya torsi (puntir) yang

tidak terduga karena adanya perubahan kekakuan secara tiba-tiba yang mengakibatkan lantai tersebut menerima gaya yang besar [2]. Selain itu, model bangunan gedung dengan tipe tidak beraturan cenderung terjadi eksentrisitas, yaitu titik pusat massa dan titik pusat rotasi tidak pada titik yang sama. Eksentrisitas tersebut dapat menyebabkan terjadinya torsi pada bangunan [3]. Torsi yang terjadi dapat menyebabkan masalah pada elemen penahan lateral yang berada pada tepi gedung serta meningkatkan *displacement* pada titik ekstrim bangunan [4].

Dalam perencanaan sistem struktur bangunan tinggi penahan gaya lateral ada beberapa metode yang digunakan, yaitu metode Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM) dan Sistem Ganda. Penentuan sistem struktur yang digunakan akan mempengaruhi besarnya efektivitas kekakuan lateral yang dihasilkan [5].

Tujuan penelitian ini untuk membandingkan bangunan yang menggunakan struktur sistem rangka pemikul momen khusus dan bangunan yang menggunakan sistem ganda. Kategori yang dibandingkan pada kedua bangunan tersebut yaitu nilai gaya geser dasar gempa, nilai simpangan antar lantai, nilai gaya-gaya dalam. Kemudian, dilakukan uji statistika pada nilai gaya-gaya dalam untuk mengetahui pengaruh penggunaan kedua sistem struktur tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Ketidakberaturan Struktur

1) Ketidakberaturan Tingkat Lunak (*Soft Story*)

Ketidakberaturan tingkat lunak merupakan salah satu bentuk ketidakberaturan berdasarkan konfigurasi vertikal. Ketidakberaturan ini dapat dipengaruhi oleh beberapa parameter [6][7], yaitu:

- a) tinggi *weak story*,
- b) adanya lantai *mezzanine*,
- c) kekakuan dan distribusi pada kolom, dinding geser, atau *bracing* pada *weak story* yang meningkatkan terjadinya torsi,
- d) klasifikasi dan sifat tanah,
- e) kondisi seismik situs.

2) Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Diskontinuitas dalam elemen penahan horizontal (diafragma) seperti bukaan besar, ketidakberaturan horizontal seperti bangunan yang tidak simetris (misalnya L-, T-, U-, F-) atau bangunan dengan

ketidakberaturan sudut dalam, dan perubahan mendadak lainnya dapat mengakibatkan torsi, deformasi diafragma dan konsentrasi tegangan [7][9].

3) Ketidakberaturan Torsi

Ketidakberaturan torsi merupakan salah satu bentuk ketidakberaturan berdasarkan konfigurasi horizontal. Torsi merupakan efek momen termasuk puntaran atau puntiran yang terjadi pada penampang. Momen torsi timbul karena adanya eksentrisitas antara pusat massa bangunan dengan kekakuannya. Pusat massa yaitu titik tangkap resultan beban mati dan beban hidup yang bekerja sesuai pada lantai tingkat tersebut. Pusat kekakuan (pusat rotasi) yaitu titik pada suatu lantai bangunan yang apabila pada lantai tersebut gaya horizontal bekerja, tidak mengalami rotasi tapi hanya bertranslasi [4][9].

B. Sistem Struktur

1) Sistem Rangka Pemikul Momen

Menurut SNI 1726-2019, sistem rangka pemikul momen adalah sistem struktur rangka yang elemen-elemen struktur dan sambungannya menahan beban-beban lateral melalui mekanisme lentur. Terdapat beberapa ciri pada sistem struktur ini, [8] yaitu:

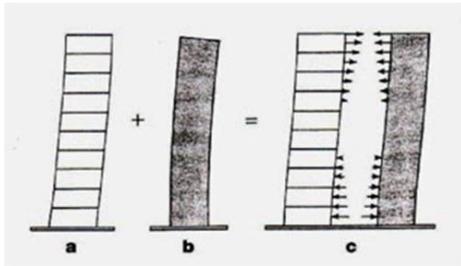
- a) beban ditransfer oleh geser di kolom sehingga menghasilkan momen pada balok dan kolom,
- b) hubungan balok kolom merupakan bagian yang penting maka harus didesain dengan baik agar sistem dapat bekerja dengan baik,
- c) momen dan geser dari beban lateral harus ditambahkan pada struktur dari beban gravitasi.

Sistem struktur yang digunakan adalah sistem rangka pemikul momen khusus dengan tingkat daktilitas penuh dan wajib diimplementasikan di daerah dengan risiko gempa yang tinggi [9][10].

2) Sistem Ganda

Sistem ganda adalah sistem struktural yang kerangka dasarnya lengkap memberikan dukungan untuk beban gravitasi dan ketahanan terhadap beban lateral disediakan oleh kerangka penahan momen dan dinding geser yang dirinci secara khusus atau kerangka yang diperkuat [13]. Rangka penahan momen harus mampu menahan setidaknya 25% dari geser dasar dan kedua sistem harus dirancang untuk menahan beban lateral total sebanding dengan kekakuan relatifnya [11].

Pada struktur sistem ganda, gabungan portal dengan dinding geser saling berinteraksi antar keduanya. Hal itu dikarenakan kedua sistem tersebut memiliki perilaku defleksi yang berbeda. Dinding geser akan berperilaku *flexural/bending mode* ketika menerima beban lateral sedangkan *frame* akan berdeformasi dalam *shear mode* [12]. Diagram interaksi antara portal dengan dinding geser dijelaskan pada **Gambar-1**.



Gambar-1 Superimpos mode individu dari deformasi [15].

a) Deformasi mode geser untuk rangka kaku (**Gambar-1a**)

Pada struktur rangka kaku, sudut deformasi (lendutan) paling besar terjadi pada dasar struktur dimana terjadi geser maksimum.

b) Deformasi mode lentur untuk dinding geser (**Gambar-1b**)

Pada struktur dinding geser, sudut deformasi (lendutan) paling besar terjadi pada bagian atas bangunan sehingga sistem dinding geser memberikan kekakuan paling kecil pada bagian atas bangunan.

c) Interaksi antara rangka kaku dan dinding geser (**Gambar-1c**)

Interaksi antara struktur rangka kaku dan dinding geser diperoleh dengan membuat superposisi mode s defleksi terpisah yang menghasilkan kurva S datar. Perbedaan sifat defleksi antara dinding geser dan rangka kaku menyebabkan geser akibat gaya lateral akan dipikul oleh rangka pada bagian atas bangunan dan dipikul oleh dinding geser di bagian bawah bangunan.

III. METODE

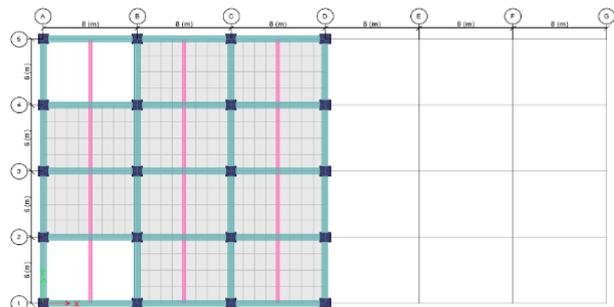
Sistem struktur yang digunakan yaitu sistem struktur rangka pemikul momen khusus (SRPMK) dan sistem ganda (kombinasi SRPMK dan dinding geser). Sistem struktur tersebut digunakan pada bangunan tidak beraturan diskontinuitas diafragma, dengan letak opening lebih dari 50% di lantai 3.

Fungsi bangunan : Perkantoran
 Jenis tanah : Tanah lunak

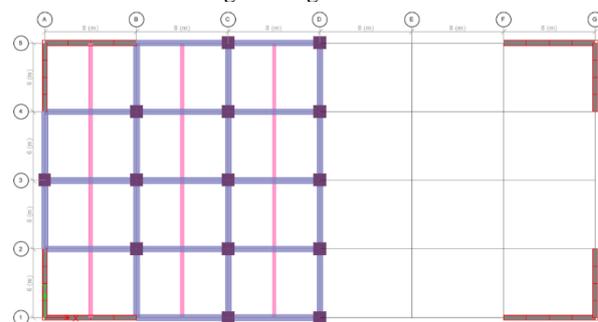
Jarak antar *grid* arah X : 8 meter
 Jarak antar *grid* arah Y : 6 meter
 Kuat tekan beton : 35 MPa
 Jumlah lantai : 10
 Tinggi tiap lantai : 3,5 meter

Penelitian ini menggunakan metode *Force Based Design* dalam perencanaan gaya gempa. Perhitungan gaya geser dasar yang dihasilkan dari gaya gempa menggunakan respon spektrum dan statik ekuivalen. Besar pembebanan gempa ke setiap lantai ditentukan oleh massa dan ketinggian lantai struktur [13][17].

Metode lain yang digunakan dalam penelitian yaitu metode statistika. Metode statistika digunakan untuk mendapatkan pengaruh penggunaan sistem struktur terhadap gaya dalam yang terjadi dengan menggunakan *software* SPSS. Analisis statistika yang dilakukan adalah analisis komparasi, dengan menggunakan Uji *Independent T* atau *Mann Whitney-U*. Seluruh objek penelitian akan dinalisis satu persatu yang dibandingkan dengan antar sistem struktur yang digunakan. Denah pemodelan pada penelitian ini dijelaskan pada **Gambar-2**.



(a) Denah lantai dengan diskontinuitas diafragma dengan struktur SRPMK

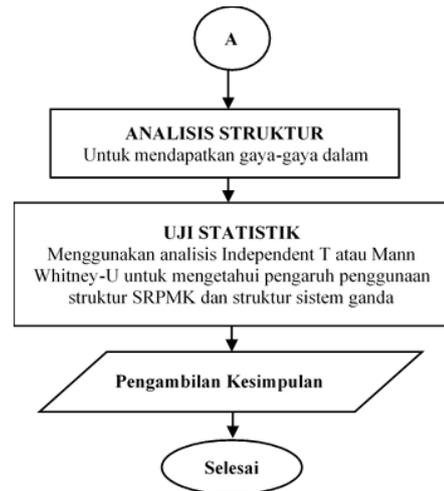
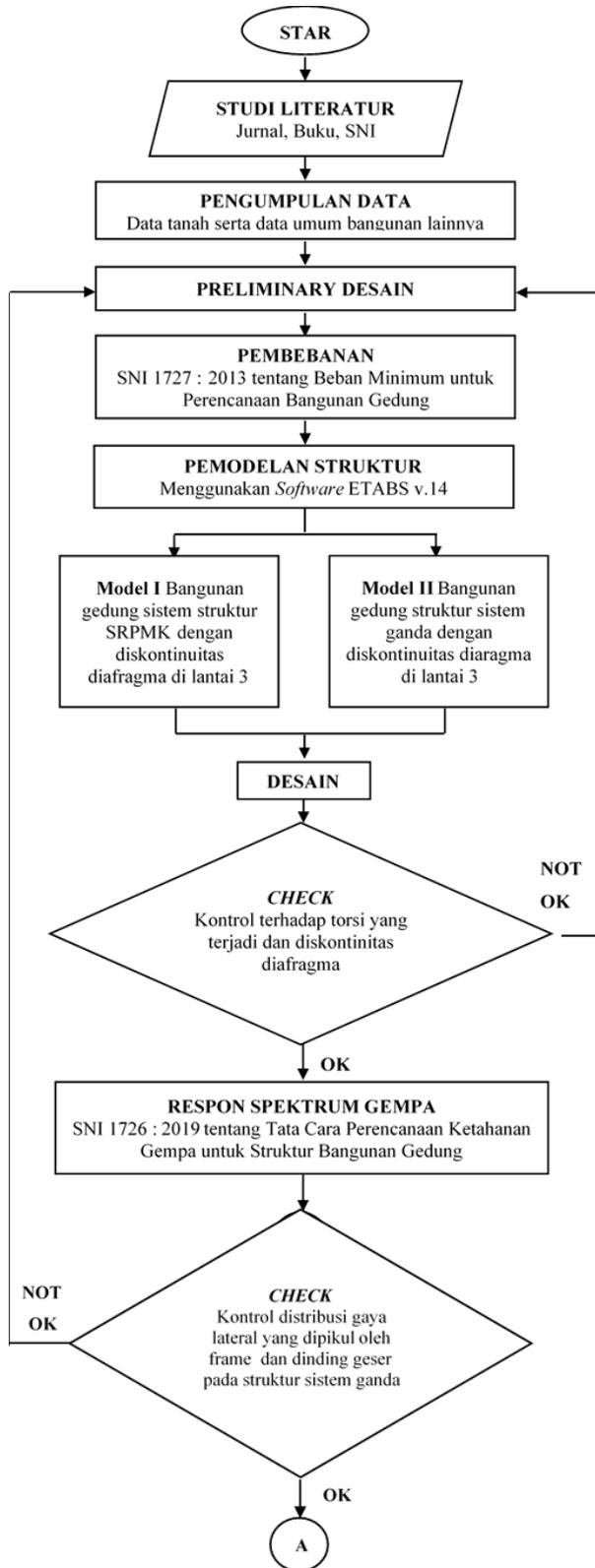


(b) Denah lantai dengan diskontinuitas diafragma dengan struktur sistem ganda

Gambar-2 Pemodelan penelitian menggunakan *Software* ETABS.

Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pemodelan yang akan digunakan, penentuan jenis struktur, analisis struktur, dan analisis statistik.

Diagram alir metode penelitian digambarkan pada Gambar-3.



Gambar-3 Diagram alir penelitian.

A. Preliminary Design

Preliminary design merupakan desain awal elemen-elemen struktur gedung seperti kolom, balok, dinding geser, dan plat lantai. Perencanaan tersebut memperhatikan batasan-batasan atau syarat-syarat yang diizinkan SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung [9].

B. Pemodelan Struktur

Struktur dimodelkan ke dalam *software* analisis 3D. Pemodelan diberikan beban sesuai dengan penghitungan pembebanan yang telah dilakukan meliputi beban mati dan beban hidup. Selanjutnya dilakukan kontrol terhadap torsi yang terjadi dan diskontinuitas diafragma menggunakan persamaan (1) dan (2).

- Untuk ketidakberaturan torsi

$$\delta_{Avg} = \left(\frac{\delta_{max}}{1,2\delta_{Av}} \right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

- Untuk ketidakberaturan torsi berlebih

$$\delta_{Avg} = \left(\frac{\delta_{max}}{1,4\delta_{Av}} \right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

Faktor pembesaran torsi tidak terduga (A) ditentukan dari persamaan (3)

$$A_x = \left(\frac{\Delta_{maks}}{1,2 \Delta_{Avg}} \right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

dengan:

δ_{Avg} : rata-rata perpindahan di titik-titik terjauh struktur di tingkat x

δ_{maks} : perpindahan maksimum di tingkat x

A_x : faktor pembesaran torsi

C. Respon Spektrum Gempa

Analisis beban gempa dinamik respon spektrum berdasarkan SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung.

Langkah-langkahnya sebagai berikut:

- 1) Menentukan kategori risiko bangunan gedung, tergantung dari fungsi bangunan serta faktor keutamaan gempa.
- 2) Menentukan parameter percepatan tanah (S_s, S_1).
- 3) Menentukan faktor klasifikasi situs ($SD - SF$) serta faktor koefisien situs (F_a, F_v).
- 4) Menghitung parameter respon percepatan (S_{MS}, S_{M1}) dan parameter percepatan situs ($SDS, SD1$).
- 5) Menghitung periode alami struktur (T_o dan T_s).
- 6) Menghitung nilai S_a .
- 7) Menggambar grafik respon spektrum.
- 8) Menentukan Kategori Desain Seismik (KDS) serta sistem dan parameter struktur (R, C_d, Ω_o).
- 9) Menghitung periode alami struktur.
- 10) Menghitung koefisien respon seismik (C_s) dan gaya geser dasar seismik (V_x).
- 11) Menghitung distribusi beban gempa di tiap lantai.
- 12) Membandingkan V_{statik} dengan V_{rs} kemudian menentukan faktor skala.
- 13) Mendapatkan *displacement* di setiap lantai akibat beban gempa.
- 14) Menghitung simpangan antar lantai.
- 15) Menentukan simpangan antar lantai $<$ simpangan ijin ($\Delta < \Delta_a/\rho$).

D. Perhitungan Beban Gempa dengan Metode Force Based Design

Penentuan beban gempa dengan metode Force Based Design (FBD) disajikan pada persamaan (4).

$$V = C_s \cdot W_t \quad (4)$$

dengan:

C_s : koefisien respons seismik yang ditentukan

W_t : berat total gedung

Langkah-langkah untuk mendapatkan beban gempa metode FBD sesuai dengan persamaan (5)-(8)

- 1) Menghitung koefisien respon seismik
 - C_s maksimum
$$\frac{SD1}{T(R/Ie)} \quad (5)$$
 - C_s hitungan
$$\frac{SDS}{(R/T)} \quad (6)$$
 - C_s min.
$$0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (7)$$
 - C_s min. tambahan untuk $S_1 < 0,6g$

$$C_s = \frac{0,5 \times S_1}{(R/Ie)} \quad (8)$$

dengan:

SDS : parameter percepatan spektrum respons disain dalam rentang periode pendek ($T = 0,2$ detik)

R : faktor modifikasi respons

I_e : faktor keutamaan gempa

SD1 : parameter percepatan spektrum respons disain dalam rentang periode panjang ($T = 1$ detik)

- 2) Menghitung periode alami struktur (T)
 - Menghitung periode fundamental pendekatan pada persamaan (9).

$$T_a = C_t h_n^2 \quad (9)$$

- Menghitung T_a maksimum menggunakan persamaan (10).

$$T_a = C_u \times T_A \quad (10)$$

- Apabila T yang digunakan dari analisis komputer dan lebih akurat (T_c), maka:
 Jika $T_c > T_a$ maks, gunakan $T = T_a$ maks
 Jika $T_a < T_c < T_a$ maks, gunakan $T = T_c$
 Jika $T_c < T_a$, gunakan $T = T_a$

- 3) Distribusi beban gempa di tiap lantai menggunakan rumus persamaan (11)-(12).

$$F_x = C_{vx} V \quad (11)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (12)$$

Keterangan:

C_{vx} : faktor distribusi vertikal

V : gaya lateral desain total (kN)

w_i, w_x : bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x .

h_i, h_x : tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x

k : eksponen yang terkait dengan periode struktur

- 4) Kontrol *base shear* (persamaan (13))
$$V_{statik} < V_{rs} \quad (13)$$

Keterangan:

V_{statik} : gaya geser yang telah dihitung sebelumnya

V_{rs} : output gaya dasar yang diperoleh dari aplikasi

Jika hasil V_{rs} lebih besar dari V_{statik} maka perlu mencari faktor skala yang diinput ke ETABS untuk perhitungan respon spektrum

- Menghitung faktor skala final pada arah X dan Y disajikan pada persamaan (14)-(15).

$$Faktor\ Skala = \frac{V_{statik}}{V_{rx}} \times V_0 \quad (14)$$

$$V_0 = \frac{g}{R/Ie} \quad (15)$$

E. Uji Statistik

Hasil respons struktur berupa gaya-gaya dalam dari penelitian ini diuji menggunakan uji statistik dengan analisis komparatif yaitu Uji *T Independent* dan Uji *Mann Whitney-U*. Uji *T Independent* dan Uji *Mann Whitney-U* yaitu uji analisis untuk mengetahui adanya perbedaan mean atau rata-rata yang signifikan antara 2 kelompok yang berskala data interval/rasio [18].

Terdapat dua variabel penelitian, yaitu:

1. Variabel *independent*: sistem struktur dengan SRPMK dan struktur sistem ganda
2. Variabel *dependent*: nilai momen dan gaya geser, pada elemen struktur yaitu balok dan kolom.

Uji statistika lain yang perlu dilakukan sebelum melakukan uji analisis yaitu Uji Normalitas dan Uji Homogenitas Varians. Jika data yang diuji tidak memenuhi persyaratan Uji Normalitas maka digunakan uji parametrik yaitu Uji *Mann Whitney-U*. Jika suatu data bersifat normal tapi tidak memenuhi persyaratan uji homogenitas varians, Uji *Independent T* tetap dapat dilakukan untuk menganalisis data penelitian, akan tetapi pengambilan keputusan mengacu pada hasil *equal variance not assumed*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gaya Geser Dasar Gempa pada Bangunan

Berdasarkan perhitungan gaya geser dasar gempa menggunakan metode *Force Based Design* diperoleh nilai gaya geser yang disajikan pada **Tabel-1**.

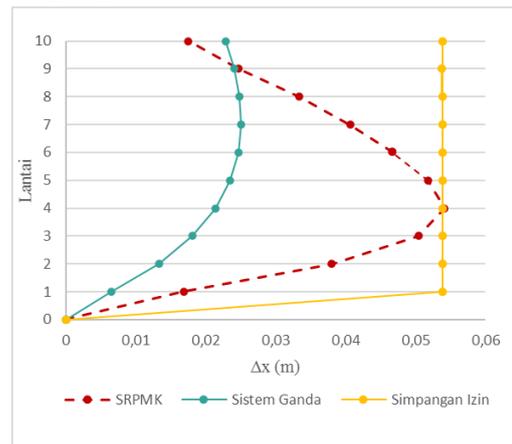
Tabel-1 Gaya geser dasar gempa pada bangunan struktur SRPMK dan Sistem Ganda

Arah	Gaya Geser Dasar Gempa (kN)		Selisih Gaya Gempa Setelah Penggunaan Sistem Ganda (%)	
	SRPMK	Sistem Ganda	SRPMK	Sistem Ganda
X	6666,5134	9801,4318	100%	147,024%
Y	6658,9270	9791,1364	100%	147,038%

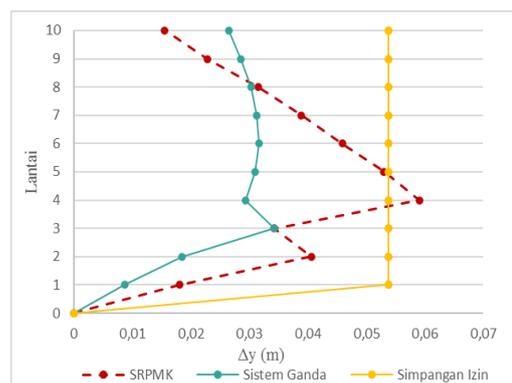
Berdasarkan **Tabel-1** nilai gaya geser dasar gempa pada arah X dan Y meningkat 47% setelah penggunaan struktur sistem ganda. Hal itu

dikarenakan berat bangunan pada struktur sistem ganda lebih besar. Pada perencanaan gaya gempa menggunakan metode *force based design* berat bangunan berbanding lurus dengan gaya gempa dasar yang diterima. Pernyataan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ref. [16], yang menyatakan bahwa gaya geser dasar menggunakan metode *force based design* lebih besar dibandingkan dengan metode *direct displacement based design* [13].

B. Simpangan Antar Lantai



Gambar-4 Grafik simpangan antar lantai arah X.



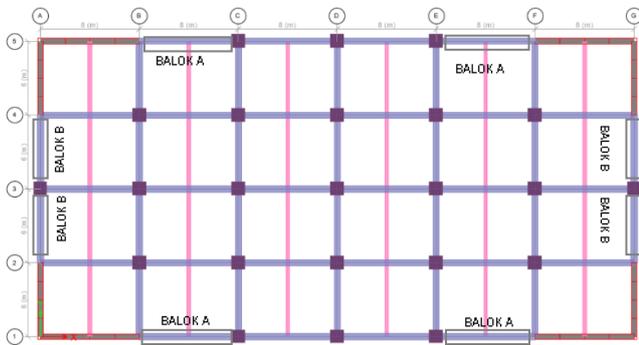
Gambar-5 Grafik simpangan antar lantai arah Y.

Berdasarkan **Gambar-4** dan **Gambar-5**, terlihat pada bangunan dengan struktur SRPMK, simpangan antar lantai terbesar terjadi di lantai 4. Hal itu dikarenakan adanya opening plat lantai lebih dari 50% (diskontinuitas diafragma) pada lantai 3 mempengaruhi kekakuan kolom di lantai 4 sehingga menimbulkan ketidakberaturan *soft story*. Pernyataan tersebut diperkuat oleh Ref. [2] yang menunjukkan bahwa simpangan antar lantai pada bangunan *soft story* lebih besar dibandingkan dengan bangunan beraturan. Selain itu, pada bangunan yang menggunakan struktur sistem ganda, dihasilkan

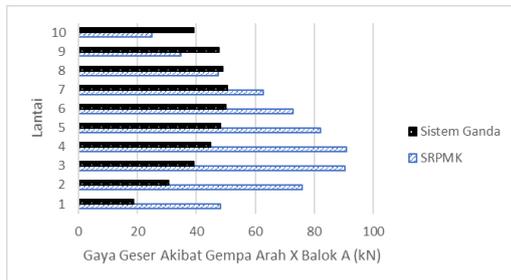
simpangan antar lantai yang semakin kecil dibandingkan saat menggunakan struktur SRPMK [2]. Penurunan simpangan diakibatkan kekakuan bangunan struktur sistem ganda lebih besar dibandingkan struktur SRPMK. Pernyataan ini diperkuat oleh penelitian [19] yang mengatakan bahwa kekakuan dinding geser mampu meredam deformasi atau simpangan horizontal akibat gempa [15].

C. Gaya-Gaya Dalam

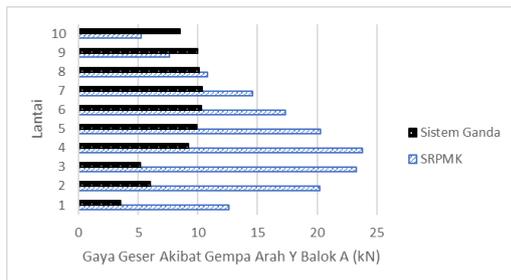
Pada struktur sistem ganda, dinding geser berfungsi meningkatkan kekakuan struktur, sehingga gaya dalam yang diterima oleh bangunan ditahan oleh frame dan dinding geser. Pemilihan balok dan kolom yang ditinjau berdasarkan letak balok yang berada di samping dinding geser, sehingga dapat diketahui pengaruh dinding geser tersebut. Denah letak balok yang ditinjau dijelaskan pada **Gambar-6**.



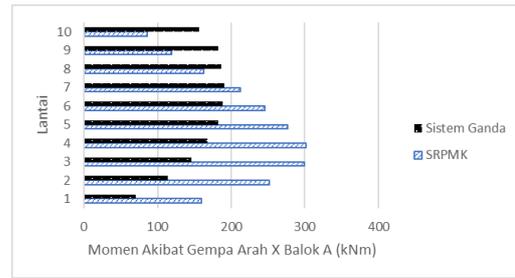
Gambar-6 Denah letak balok yang ditinjau.



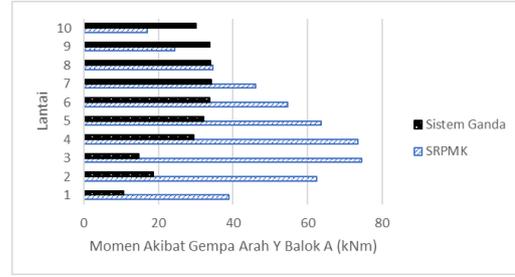
(a) Diagram batang nilai gaya geser akibat gempa arah X balok A.



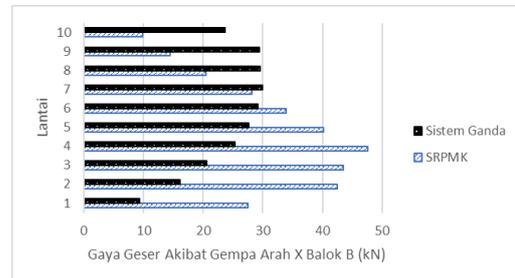
(b) Diagram batang nilai gaya geser akibat gempa arah Y balok A.



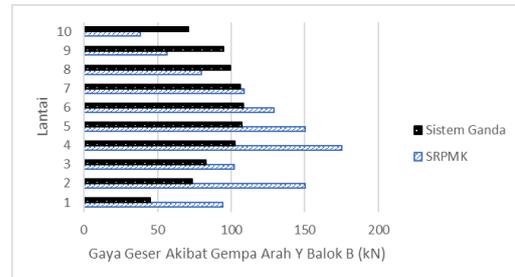
(c) Diagram batang nilai momen akibat gempa arah X balok A.



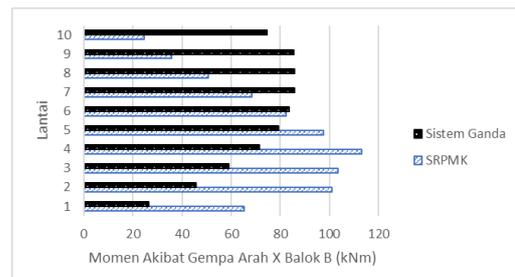
(d) Diagram batang nilai momen akibat gempa arah Y balok A.



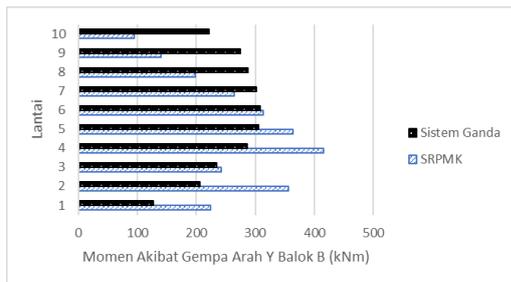
(e) Diagram batang nilai gaya geser akibat gempa arah X balok B.



(f) Diagram batang nilai gaya geser akibat gempa arah Y balok B.

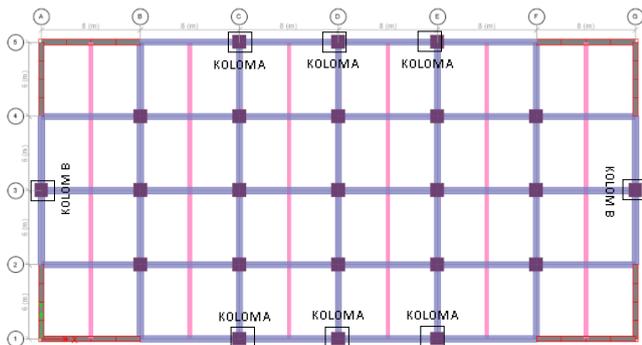


(g) Diagram batang nilai momen akibat gempa arah X balok B.

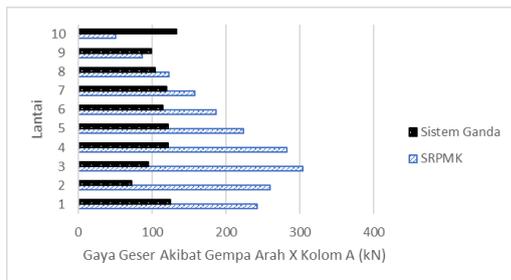


(h) Diagram batang nilai momen akibat gempa arah Y balok B
Gambar-7 Diagram batang nilai gaya-gaya dalam balok yang ditinjau

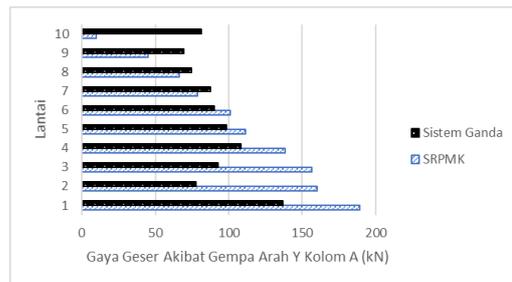
Berdasarkan **Gambar-7**, setelah penggunaan sistem ganda, gaya geser dan momen yang terjadi di balok A mengalami penurunan pada bagian bawah bangunan namun mengalami peningkatan pada bagian atas bangunan. Hal itu dikarenakan, deformasi (lendutan) yang terjadi pada dinding geser paling besar di bagian atas bangunan sehingga kekakuan paling kecil yang diberikan dinding geser terdapat bagian atas bangunan [16]. Selain itu, kemampuan dinding geser dalam menahan gaya dalam pada suatu bangunan dipengaruhi oleh konfigurasi geometri dan lokasi dinding geser tersebut [17].



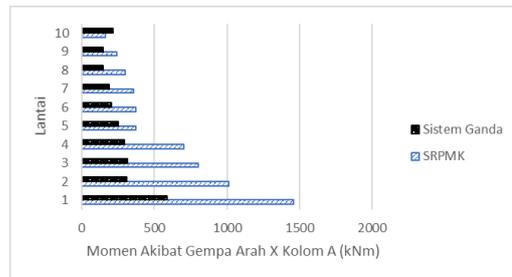
Gambar-8 Denah letak kolom yang ditinjau



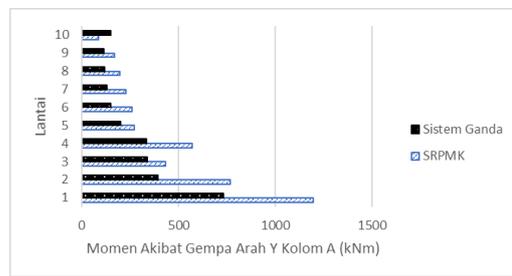
(a) Diagram batang nilai gaya geser akibat gempa arah X kolom A



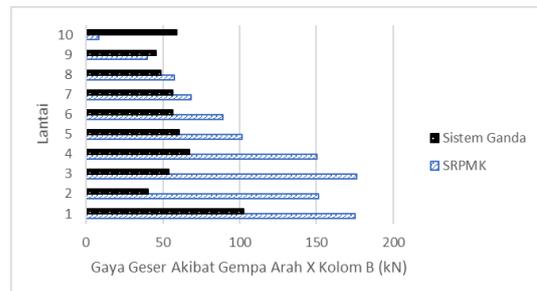
(b) Diagram batang nilai gaya geser akibat gempa arah Y kolom A



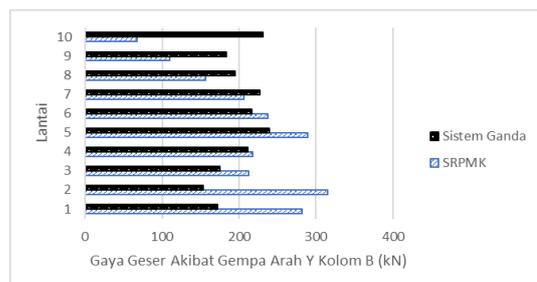
(c) Diagram batang nilai momen akibat gempa arah X kolom A



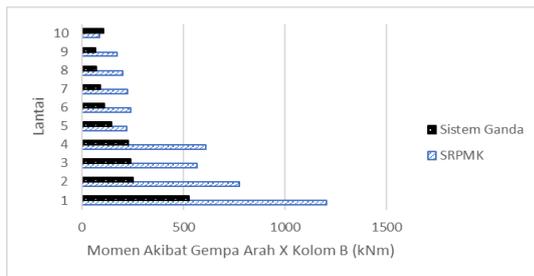
(d) Diagram batang nilai momen akibat gempa arah Y kolom A



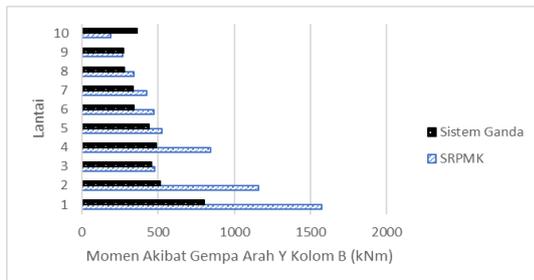
(e) Diagram batang nilai gaya geser akibat gempa arah X kolom B



(f) Diagram batang nilai gaya geser akibat gempa arah Y kolom B



(g) Diagram batang nilai momen akibat gempa arah X kolom B



(h) Diagram batang nilai momen akibat gempa arah Y kolom B

Gambar-9 Diagram batang nilai gaya-gaya dalam kolom yang ditinjau

Berdasarkan **Gambar-8** dan **Gambar-9**, penurunan nilai gaya geser dan momen yang terjadi pada kolom setelah penggunaan sistem ganda bersifat fluktuatif. Hal tersebut diakibatkan karena pada bangunan dengan struktur SRPMK mengalami ketidakberaturan torsi. Ketidakberaturan torsi dapat meningkatkan simpangan pada titik ekstrim bangunan dan menyebabkan masalah pada elemen penahan lateral yang berada pada tepi Gedung [4]. Torsi yang terjadi pada bangunan diakibatkan adanya perbedaan yang signifikan antara simpangan antar lantai tingkat maksimum pada sebuah ujung struktur dengan simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur [18].

D. Analisis Statistik Pada Gaya-Gaya Dalam

Pada pengujian analisis statistik menggunakan Uji *Independent T* dan *Mann Whitney U*.

Hipotesis dalam penelitian ini berupa hipotesis komparatif yaitu:

H0 : Tidak ada pengaruh yang signifikan setelah penggunaan struktur sistem ganda.

H1 : Ada pengaruh yang signifikan setelah penggunaan struktur sistem ganda.

Uji *Mann Whitney U* digunakan ketika syarat uji normalitas dari Uji *Independent T* tidak terpenuhi. Uji *Mann Whitney U* digunakan pada momen akibat gempa arah Y yang terjadi di balok B.

Tabel-2 Uji Hipotesis *Independent T Test* dan *Mann Whitney U* pada balok

	Gaya-Gaya Dalam		Sig.
Balok A	Geser Akibat Gempa Arah X	<i>Equal variances not assumed</i>	0,021
	Geser Akibat Gempa Arah Y	<i>Equal variances not assumed</i>	0,006
Balok B	Geser Akibat Gempa Arah X	<i>Equal variances not assumed</i>	0,170
	Geser Akibat Gempa Arah Y	<i>Equal variances assumed</i>	0,220
Balok A	Momen Akibat Gempa Arah X	<i>Equal variances not assumed</i>	0,071
	Momen Akibat Gempa Arah Y	<i>Asymp Sig. (2-tailed)</i>	0,008
Balok B	Momen Akibat Gempa Arah X	<i>Equal variances assumed</i>	0,701
	Momen Akibat Gempa Arah Y	<i>Equal variances assumed</i>	0,875

Pada uji hipotesis, data memiliki pengaruh yang signifikan apabila nilai signifikansi kurang dari 0,05 ($< 0,05$). Berdasarkan pada **Tabel-2**, di balok A nilai signifikansi yang kurang dari 0,05 ($< 0,05$) terdapat pada gaya geser akibat gempa arah X, gaya geser akibat gempa arah Y, dan momen akibat gaya gempa arah Y. Di balok B, tidak ada nilai signifikansi yang kurang dari 0,05 ($< 0,05$). Maka, total nilai signifikansi yang kurang dari 0,05 yaitu 3 dari 8 data yang diuji hipotesis, sehingga pada balok hipotesis yang diterima yaitu H0 atau tidak ada pengaruh yang signifikan setelah penggunaan struktur sistem ganda.

Tabel-3 Uji hipotesis *Independent T Test* pada kolom

	Gaya-Gaya Dalam		Sig.
Kolom A	Geser Akibat Gempa Arah X	<i>Equal variances not assumed</i>	0,015
	Geser Akibat Gempa Arah Y	<i>Equal variances not assumed</i>	0,477
Kolom B	Geser Akibat Gempa Arah X	<i>Equal variances not assumed</i>	0,113
	Geser Akibat Gempa Arah Y	<i>Equal variances not assumed</i>	0,744
Kolom A	Momen Akibat Gempa Arah X	<i>Equal variances assumed</i>	0,021
	Momen Akibat Gempa Arah Y	<i>Equal variances assumed</i>	0,258
Kolom B	Momen Akibat Gempa Arah X	<i>Equal variances assumed</i>	0,033
	Momen Akibat Gempa Arah Y	<i>Equal variances assumed</i>	0,324

Pada Uji Hipotesis, data memiliki pengaruh yang signifikan apabila nilai signifikansi kurang dari 0,05 ($< 0,05$). Berdasarkan pada **Tabel-3**, di kolom A nilai signifikansi yang kurang dari 0,05 ($< 0,05$) terdapat pada geser akibat gempa arah X dan momen akibat gempa arah X. Di kolom B, nilai signifikansi yang kurang dari 0,05 ($< 0,05$) terdapat pada momen akibat gempa arah X. Maka, total nilai signifikansi yang kurang dari 0,05 yaitu 3 dari 8 data yang diuji hipotesis, sehingga pada kolom hipotesis yang diterima yaitu H_0 atau tidak ada pengaruh yang signifikan setelah penggunaan struktur sistem ganda.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

1. Gaya geser dasar gempa yang terjadi pada bangunan lebih besar saat menggunakan struktur sistem ganda daripada struktur sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK), hal itu dikarenakan pada perencanaan gaya gempa menggunakan metode *force based design*, semakin berat bangunan maka gaya gempa yang diterima semakin besar .
2. Simpangan yang terjadi di tiap lantai mengalami penurunan setelah menggunakan struktur sistem ganda, hal itu dikarenakan kekakuan yang dimiliki oleh struktur sistem ganda lebih besar daripada sistem struktur rangka pemikul momen khusus (SRPMK). Semakin besar kekakuan yang dimiliki oleh bangunan, maka semakin kecil simpangan yang terjadi.
3. Pada balok dan kolom, setelah struktur sistem ganda digunakan nilai gaya geser dan momen yang terjadi mengalami penurunan. Penurunan tersebut dikarenakan kekakuan yang dimiliki dinding geser membantu frame dalam menerima gaya gempa. Penurunan nilai tersebut bersifat fluktuatif. Hal itu dikarenakan pada bangunan dengan struktur SRPMK mengalami ketidakberaturan torsi yang dapat menimbulkan masalah pada elemen penahan lateral yang berada pada tepi gedung.
4. Hasil uji hipotesis yang dilakukan pada balok dan kolom yang ditinjau adalah hipotesis penelitian (H_0) yaitu tidak ada pengaruh yang signifikan setelah penggunaan struktur sistem ganda.

B. Saran

1. Perlu ditinjau hasil kinerja struktur dengan analisis *pushover*.

2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan letak dinding geser yang tidak diletakkan di sudut-sudut bangunan.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan letak *opening* 50% (diskontinuitas diafragma) yang tidak diposisikan di lantai 3.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SNI 1726:2019, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Bandung: Badan Standardisasi Indonesia, 2019.
- [2] K. Siajaya *et al.*, “Respons Struktur Gedung Bertingkat Dengan Variasi Kekakuan Kolom Akibat Gempa,” *J. Sipil Statik*, vol. 6, no. 6, pp. 411-422, 2018.
- [3] A. Y. N. Theodorus Widodo, Jusuf J.S. Pah, “Analisa Perbandingan Dinding Geser yang Simetris dan Tidak Simetris,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 2, no. 1, pp. 87-92, 2013.
- [4] M. Lumban, B. Servie, O. Dapas, and S. E. Wallah, “Efisiensi Penggunaan Dinding Geser Untuk Mereduksi Efek Torsi Pada Bangunan Yang Tidak Beraturan,” *J. Sipil Statik Januari*, vol. 4, no. 1, pp. 29-35, 2016.
- [5] A. Sofian and A. Arrosyid, “Analisis Perbandingan Sistem Ganda dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus Pada Desain Struktur Gedung Asrama Mahasiswa Unimus di Semarang,” *Tugas Akhir Universitas Islam Sultan Agung*, 2019.
- [6] N. Kirac, M. Dogan, and H. Ozbasaran, “Failure of weak-storey during earthquakes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 18, no. 2, pp. 572-581, 2011.
- [7] F. S. Anggriawan and A. Rosyidah, “Kinerja Struktur Bangunan dengan *Floating Columns* terhadap Beban Gempa,” *Potensi*, vol. 22, no. 1, pp. 96-103, 2020.
- [8] P. Agarwal and M. Shrikhande, *Earthquake Resistant Design of Structures*. PHI Learning Pvt. Ltd, 2006.
- [9] H. Yurizka and A. Rosyidah, “The Performance of Irregular Building Structures Using Pushover Analysis,” *Log. J. Ranc. Bangun dan Teknol.*, vol. 20, no. 2, pp. 65-72, 2020.
- [10] I. Imran and F. Hendrik, *Perencanaan Lanjut Struktur Beton Bertulang*. Bandung: ITB Press, 2014.
- [11] 2019 SNI 2847, “Penetapan Standar Nasional Indonesia 2847: 2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan

Penjelasan Sebagai Revisi Dari Standar Nasional Indonesia 2847 : 2013,” no. 8, 2019.

- [12] A. Widyaningrum and Y. Haryanto, “Evaluasi Kinerja Gedung Dinas Kependudukan Dan Catatan Sipil Purbalingga Dengan Analisis Pushover,” *Din. Rekayasa*, vol. 15, no. 2, p. 87, 2019.
- [13] G. Nandini Devi, “Behaviour of Reinforced Concrete Dual Structural System: Strength, Deformation Characteristics, and Failure Mechanism,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 14-19, 2013.
- [14] E. Sulistyawan, “Modifikasi Perancangan Gedung Training Center II Universitas Diponegoro Semarang dengan Menggunakan Sistem Ganda Berdasarkan SNI 1726-2012,” Tugas Akhir Universitas Muhammadiyah Malang, 2018.
- [15] W. Schueller, *Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi*. 1989.
- [16] A. D. Puspita and A. Rosyidah, “Force Based Design and Direct Displacement Based Design for Dual System Structure,” *Log. J. Ranc. Bangun dan Teknol.*, vol. 19, no. 3, pp. 162, 2019.
- [17] N. Ramadhani A.P. and A. Rosyidah, “Direct Displacement Based Design and Capacity Spectrum Method for Special Moment Resisting Frame,” *Log. J. Ranc. Bangun dan Teknol.*, vol. 20, no. 1, pp. 6-12, 2020.
- [18] Sugiyono, “Statistik Untuk Penelitian.” CV ALFABETA, Bandung, Jawa Barat, 2007.
- [19] Heru, Reni, and Alex, “Kajian Posisi Shear Wall Pada Gedung Tidak Beraturan dengan Analisis Riwayat Waktu Beban Gempa,” *Jom FTEKNIK*, vol. 3, no. 1, pp. 1-13, 2016.