

## Studi Kinerja Gedung Bertingkat Tinggi Dengan Sistem Diagrid Akibat Pembebanan Gempa

<sup>1</sup>Prima Sukma Yuana, <sup>2</sup>Raiyyan Rahmi Isda, <sup>3</sup>Xbal Meiprasetyo

Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Jl. Terusan Jend. Sudirman, Cibeer, Cimahi, 0226641743

e-mail: [prima.sukma@lecture.unjani.ac.id](mailto:prima.sukma@lecture.unjani.ac.id)

Receive: 6 Desember 2021

Accepted: 17 Januari 2023

### Abstract

*There are types of tall buildings have been built in the world even in Indonesia. Also various materials have been widely used, such a steel material as one of the most reliable material for building construction. Diagrid system is one type of tall building that can be chosen because it can provide different configuration and also gives a unique shape from the architectural side. Problems arise when buildings with diagrid systems will be planned in Indonesia. Indonesian earthquake regulation SNI 1726-2019 has not been discussed about the diagrid system. Thus, an engineer can not find the earthquake resistant building design parameters such as  $R$ ,  $\Omega_0$ , and  $C_d$ . The analysis was conducted by a linear analysis and design process, then continue with a nonlinear static pushover method. Target of directional displacement is 698,342 mm. The last process is calculate the earthquake parameters which is needed in the design process, among others  $R$ ,  $\Omega_0$ , and  $C_d$ . Obtained the actual value of the response modification factor  $R$  is 3,812; the actual value of  $\Omega_0$  is 1,562; and the actual value of  $C_d$  is 3,928.*

**Keywords:** Tall Bulding, Diagrid,  $R$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_d$

### Abstrak

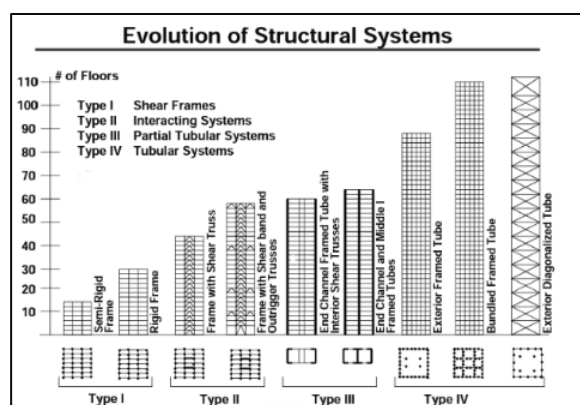
Beberapa dari tipe bangunan tinggi sudah banyak diterapkan di dunia termasuk di Indonesia. Beragam material sudah banyak digunakan, salah satu yang cukup diandalkan dalam mendesain gedung tinggi adalah material baja. Perkembangan saat ini untuk gedung baja adalah bagaimana memanfaatkan baja pada sembarang sistem struktur yang rasional untuk gedung tinggi, salah satunya adalah sistem struktur diagrid yang memberikan konfigurasi berbeda pada struktur dan juga menghasilkan tampilan unik dari sisi arsitektural. Permasalahan muncul disaat gedung dengan sistem diagrid akan direncanakan di Indonesia. Dalam peraturan gempa Indonesia SNI 1726-2019 belum dibahas mengenai sistem tersebut termasuk parameter perancangan bangunan tahan gempa seperti  $R$ ,  $\Omega_0$ , dan  $C_d$  yang mana parameter tersebut pasti digunakan dalam prosesnya. Analisis dilakukan dengan metode nonlinier statik *pushover*. Nilai target perpindahan yang diperoleh sebesar 698,342 mm. Terakhir adalah mencari parameter gempa yang diperlukan dalam proses desain antara lain  $R$ ,  $\Omega_0$ , dan  $C_d$ . Diperoleh nilai aktual faktor modifikasi respon  $R$  sebesar 3,812, nilai  $\Omega_0$  aktual sebesar 1,562, dan nilai  $C_d$  aktual sebesar 3,928.

**Kata Kunci:** Gedung Tinggi, Diagrid,  $R$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_d$

## PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur khususnya bangunan gedung. Bangunan gedung tidak lagi dibuat luas secara horizontal untuk menampung jumlah manusia yang terlibat di dalamnya, namun pembangunan dibuat luas secara vertikal. Selain itu, harga lahan yang melambung tinggi menjadi penyebab diperlukannya pembangunan ke arah vertikal. Hal ini pasti membuat gedung akan memiliki angka kelangsingan yang tinggi.

Angka kelangsingan adalah perbandingan antara tinggi bangunan dengan lebarnya. Semakin tinggi angka kelangsingan maka semakin besar pula pergerakan horizontalnya. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem struktur yang dapat mengantisipasi perpindahan agar perpindahan yang terjadi masih berada dalam batas toleransi. Pada tahun 1965, Fazlur Khan mencoba mengategorikan sistem struktur agar mampu lebih efektif dalam menahan beban lateral. Ada beberapa kategori sistem struktur antara lain *shear frame*, *interacting system*, *partial tubular system*, dan *tubular system* seperti dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Perbandingan Sistem Struktur  
Sumber: *Structural systems for tall buildings* (1995)

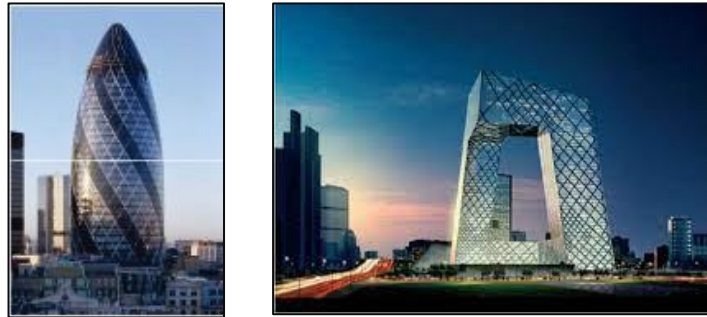
Beberapa dari tipe yang disebutkan sebelumnya sudah banyak diterapkan untuk bangunan tinggi di dunia termasuk di Indonesia. Beragam material pun banyak digunakan, salah satu yang cukup diandalkan dalam mendesain gedung tinggi adalah material baja. Berbagai kelebihan dimiliki material baja dibanding material beton, walaupun kenyataannya saat ini gedung dengan material beton masih mendominasi. Berbagai kemajuan sudah diperoleh dalam proses desain gedung tinggi baja, bagaimana mendesain sistem struktur gedung baja yang paling efisien dalam menahan beban lateral, bagaimana merancang bangunan baja yang tahan api dan tahan korosi, bagaimana merancang teknik fabrikasi dan pemasangan, yang semuanya dikombinasikan dengan analisis canggih menggunakan komputer.

Perkembangan saat ini untuk gedung baja adalah bagaimana memanfaatkan baja pada sembarang sistem struktur yang rasional untuk gedung tinggi, salah satunya adalah sistem struktur diagrid yang memberikan konfigurasi berbeda pada struktur dan juga menghasilkan tampilan unik dari sisi arsitektural.

Sistem diagrid merupakan modifikasi dari sistem tubular yang menurut Fazlur Khan optimal jika digunakan untuk gedung 60 lantai ke atas. Sistem diagrid terbentuk dari rangka berbentuk diagonal yang saling berhubungan. Material yang digunakan sebagian besar menggunakan material baja. Selain menawarkan kecepatan dalam konstruksi, berat yang

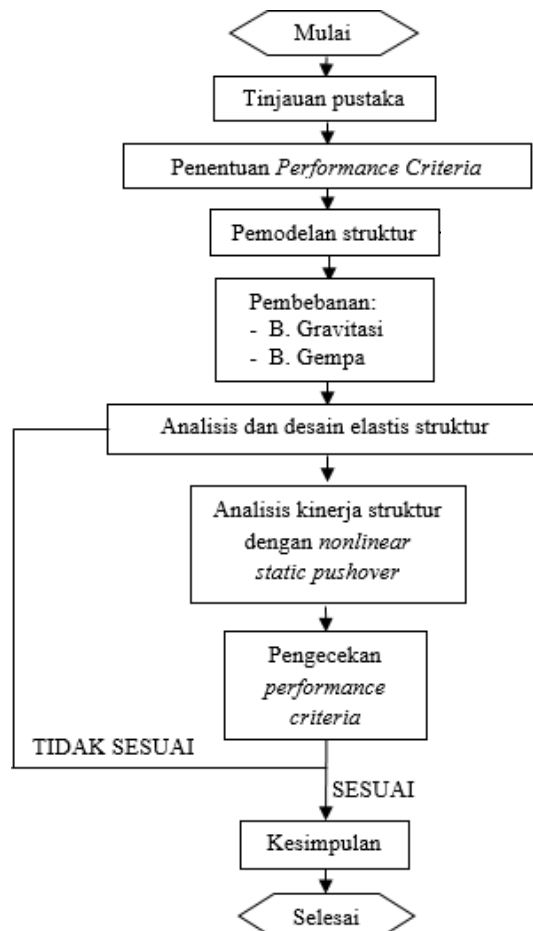
lebih ringan, lebih mudah dalam pelaksanaan, sambungan elemen yang lebih sederhana, gedung baja pun cocok dengan *sustainability concept* atau gedung dengan konsep yang berkelanjutan.

Beberapa contoh gedung populer yang menggunakan sistem struktur diagrid adalah *30 St Mary Axe Tower* di London yang dibangun tahun 2003 dan *Central China Television (CCTV)* di Beijing yang dibangun tahun 2012 seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2 *30 St. Mary Axe* London (kiri), CCTV Beijing (kanan)  
Sumber: [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com)

#### METODE PENELITIAN



Gambar 3 Diagram Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan membuat model gedung tinggi dengan sistem diagrid. Langkahnya dengan analisis linier dilanjutkan dengan analisis nonlinier statik *pushover* untuk mendapatkan gambaran kinerja struktur. Kemudian didapatkan parameter gempa yang diperlukan dalam proses desain seperti  $R$ ,  $\Omega_0$ , dan  $C_d$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

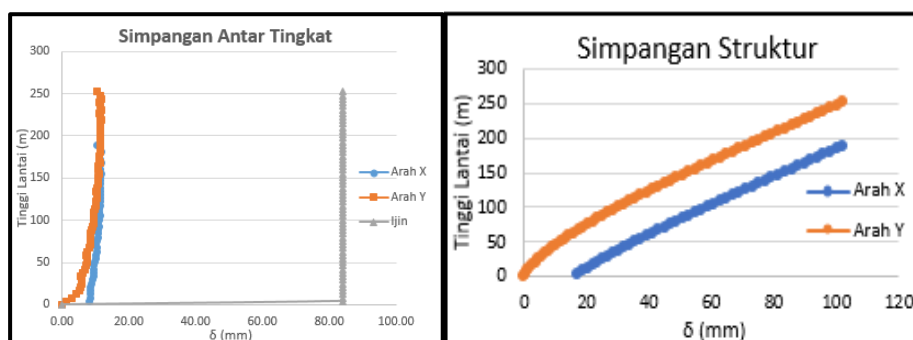
### Analisis Elastis

Analisis elastis dilakukan menggunakan Program ETABS v19 dengan melakukan pengecekan nilai perioda (analisis modal), analisis gaya geser, dan analisis simpangan. Analisis modal dilakukan untuk mencari nilai periode struktur terutama yang akan digunakan dalam analisis gempa. Adapun modal partisipasi massa yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Modal Partisipasi Massa

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY
Modal	1	7.042	0.0045	0.6434	0	0.0045	0.6434
Modal	2	7.042	0.6434	0.0045	0	0.6479	0.6478
Modal	3	1.781	0	0	0	0.6479	0.6478
Modal	4	1.682	0.0031	0.2013	0	0.651	0.8491
Modal	5	1.682	0.2013	0.0031	0	0.8522	0.8522
Modal	6	0.787	0.0171	0.0413	0	0.8694	0.8935
Modal	7	0.787	0.0413	0.0171	0	0.9107	0.9107

Berdasarkan data Tabel 1 didapatkan partisipasi massa  $\geq 90\%$  dimulai dari mode 7. Analisis gaya geser dilakukan dengan perbandingan nilai gaya gempa statik dan gaya gempa dinamik yang akan menjadi *scale factor* pada masing arah gempa yaitu arah-x sebesar 1,3 dan arah-y sebesar 1,3 sehingga dipenuhi persyaratan bahwa gaya geser dinamik memenuhi 100% gaya geser statik. Pada Gambar 4 disajikan hasil analisis elastis berupa grafik simpangan antar tingkat (kiri) dan grafik simpangan struktur (kanan).



Gambar 4 Grafik Simpangan

Berdasarkan Gambar 4 nilai simpangan antar tingkat tidak melebihi nilai simpangan izin sehingga memenuhi syarat simpangan. Sementara pada Tabel 2 disajikan nilai rasio kapasitas penampang tiap elemen struktur.

Tabel 2 Rasio kapasitas penampang

Elemen Struktur	Profil Penampang	PMM-Ratio maksimum	Rasio Izin	Keterangan
Kolom 1	KC 500.500.60.100	0,343	1	OK
Kolom 2	KC 800.800.90.150	0,278	1	OK
Kolom 3	KC 1200.1200.120.18-	0,363	1	OK
Elemen diagrid	D900 t = 30	0,626	1	OK
Balok	IWF 700.400.25.40	0,59	1	OK

Berdasarkan Tabel 2 nilai PMM-ratio maksimum dari tiap elemen struktur tidak melebihi rasio izin sehingga penampang memenuhi syarat desain kekuatan dan bisa dilanjutkan ke analisis nonlinier statik *pushover*.

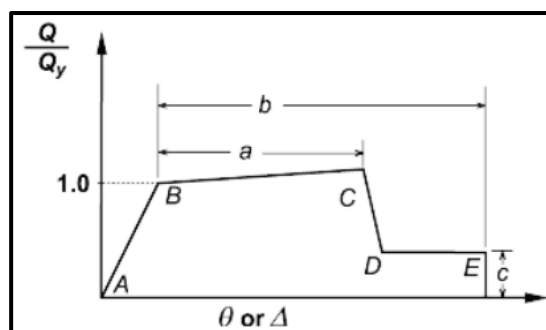
### Analisis Nonlinier Inelastis

#### Statik *Pushover*

Analisis *pushover* dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu pembebanan awal dan pembebanan lateral. Berdasarkan tahapan tersebut nilai beban-beban statik yang ditingkatkan secara bertahap sampai dengan melampaui pembebanan yang dapat menyebabkan terjadinya pelelehan pertama (sendi plastis) pada struktur gedung. Elemen struktur pada gedung diantaranya balok, kolom, dan elemen diagrid dimodelkan inelastik menggunakan program ETABS v19 dalam hubungan gaya dan deformasi. Analisis statik *pushover* dilakukan dengan meninjau 1 arah yaitu arah-X karena pada penelitian ini memiliki model gedung yang simetris untuk arah X dan Y.

#### Pemodelan Sendi Plastis

Pada penentuan sendi plastis yang terjadi dilakukan otomatis oleh program ETABS v19 dengan metode ASCE 41-13 sehingga hanya perlu melakukan input beban yang diaplikasikan seperti P, M3, dan P-M2-M3 pada Gambar 5 disajikan grafik hubungan gaya-deformasi secara umum dengan metode ASCE 41-13.



Gambar 5 Hubungan gaya-deformasi secara umum  
Sumber: ASCE 41-13

Balok baja dimodelkan dalam bentuk hubungan momen-rotasi dimana kekuatan momen leleh dan momen puncak diperoleh dari perhitungan manual dari properti penampang balok seperti berikut,

$$M_y = f_y S_x$$

$$M_p = f_y Z_x$$

Rotasi balok dihitung berdasarkan kurvatur yang dikalikan dengan panjang sendi plastis, diasumsikan setengah dari tinggi balok, seperti pada persamaan berikut,

$$\theta = \frac{\psi H}{2}$$

$$\theta_y = \frac{M_y H}{EI} \frac{1}{2}$$

$$\theta_p = \frac{M_p H}{EI} \frac{1}{2}$$

Dimana :

- $M_y$  : Momen leleh balok
- $M_p$  : Momen plastis balok
- $f_y$  : Tegangan leleh baja
- $S_x$  : Modulus penampang
- $Z_x$  : Modulus plastis penampang
- $\theta$  : Rotasi balok
- $\theta_y$  : Rotasi leleh balok
- $\theta_p$  : Rotasi plastis balok
- $E$  : Modulus elastisitas baja
- $I$  : Momen inersia arah momen yang ditinjau
- $\Psi$  : Kurvatur balok
- $H$  : Tinggi balok

Level kinerja balok ditentukan berdasarkan besar rotasinya seperti pada Tabel. 3.

Tabel 3 Level kinerja balok berdasarkan besar rotasi

Y	IO	LS	CP	F
$\theta_y$	$\theta_y$	$6,75 \theta_y$	$9 \theta_y$	$12 \theta_y$

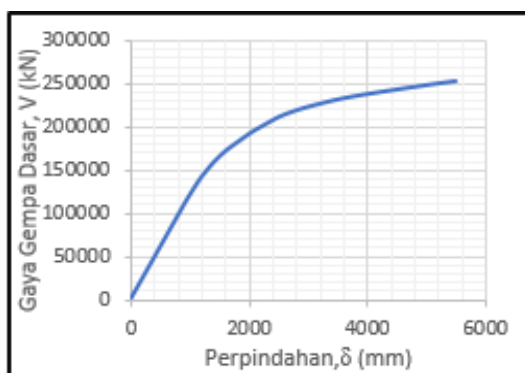
Konfigurasi struktur diagrid memiliki tiga macam elemen yaitu elemen yang berbentuk bresing (kolom tepi diagonal), kolom interior, dan balok. Elemen yang berbentuk kolom dan balok level kinerja ditentukan seperti pada Tabel 3. Elemen bresing ditentukan level kinerjanya berdasarkan regangan aksial dengan perbandingan regangan aksial saat terjadi tekuk sebagai acuan untuk bresing tekan dan perbandingan dengan regangan leleh untuk bresing tarik seperti yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Level kinerja untuk bresing diagonal *outrigger* dan *belt truss*

Level Kinerja Bresing Tekan					
Kelangsingan Penampang	Y	IO	LS	CP	F
$\frac{KL}{r} > 4,33 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\Delta_e$	$0,5 \Delta_e$	$8 \Delta_e$	$10 \Delta_e$	$12 \Delta_e$
$\frac{KL}{r} < 2,1 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\Delta_e$	$0,5 \Delta_e$	$7 \Delta_e$	$8 \Delta_e$	$12 \Delta_e$
Level Kinerja Bresing Tarik					
Bentuk Profil	Y	IO	LS	CP	F
<i>Wide Flange</i>	$\Delta_T$	$0,5\Delta_T$	$10 \Delta_T$	$13 \Delta_T$	$20 \Delta_T$
Catatan :					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\Delta_e</math> : Regangan aksial saat terjadinya tekuk pada bresing tekan</li> <li>- <math>\Delta_T</math> : Regangan aksial saat terjadinya leleh pada bresing tarik</li> <li>- Untuk bresing tekan yang memiliki nilai kelangsingan diantara batasan yang terteralevel kinerja dapat ditentukan berdasarkan interpolasi linear</li> </ul>					

### Hasil Analisis Statik *Pushover*

*Output* dari analisis *pushover nonlinear* berupa grafik kapasitas gaya geser dasar akibat gempa *versus* perpindahan. Dari grafik kapasitas tersebut maka dapat diketahui kinerja struktur dan besarnya gaya geser yang terjadi seperti yang telah disajikan pada Gambar 6.



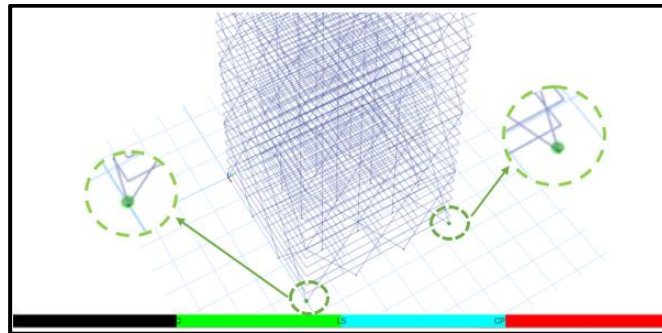
Gambar 6 Grafik kapasitas gaya gempa dasar versus perpindahan

### Leleh Pertama

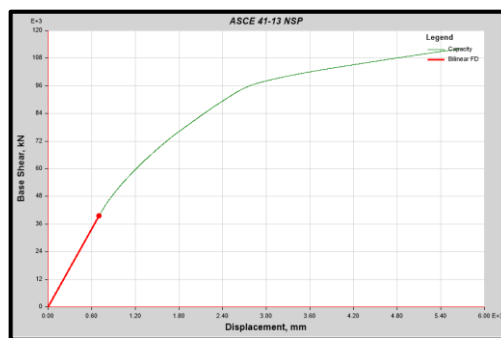
Leleh pertama ditandai dengan munculnya sendi plastis, pada penelitian ini terjadi pada step 962 seperti yang disajikan pada Gambar 5 dengan nilai perpindahan sebesar 18,835 mm.

### Target perpindahan

Target perpindahan dilakukan dengan metode ASCE 41-13 yang dihitung otomatis oleh program ETABS, sehingga diperoleh grafik yang disajikan pada Gambar 8.



Gambar 7 Leleh pertama

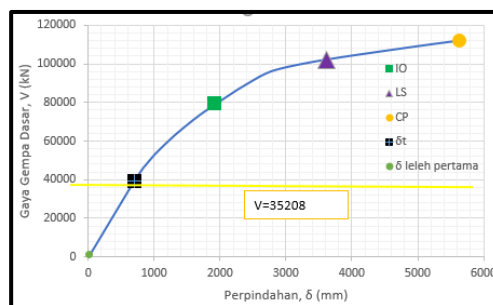


Gambar 8 Grafik target perpindahan dengan metode ASCE 41-13

Berdasarkan Gambar 8 titik berwarna merah merupakan titik target perpindahan, maka nilai target perpindahan sebesar  $\delta_t = 698,342$  mm.

### Level kinerja struktur

Level kinerja struktur dalam penelitian ini ditentukan menggunakan metode ASCE 41-13 yang telah dihitung otomatis oleh program ETABS v19. Pada Gambar 9 disajikan grafik untuk plotting IO, LS, CP dan nilai target perpindahan. Berdasarkan Gambar 9 plotting nilai target perpindahan berada pada IO maka level kinerja struktur adalah IO.

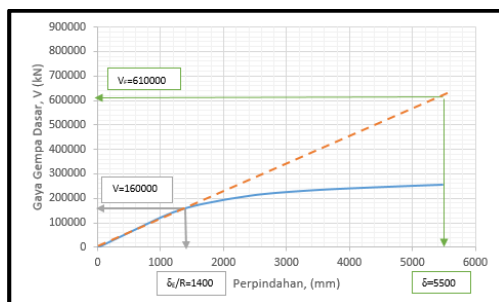


Gambar 9 Grafik plotting level kinerja struktur

### Evaluasi Nilai Faktor R, $\Omega_0$ dan $C_d$ Aktual

Nilai faktor modifikasi respon R,  $\Omega_0$ , dan  $C_d$ . aktual dihitung dengan menggunakan persamaan dari FEMA P-695 (2009). Parameter perhitungan dapat dilihat dari Gambar 10.





Gambar 10 Definisi faktor daktilitas struktur dari grafik V- $\delta$

$$R = \frac{V_E}{V} = \frac{610000}{160000} = 3,812$$

$$\Omega_0 = \frac{V_{max}}{V} = \frac{250000}{160000} = 1,562$$

$$C_d = \frac{\delta}{\delta_E/R} = \frac{5500}{1400} = 3,928$$

Berdasarkan perhitungan di atas diperoleh nilai aktual faktor modifikasi respon R sebesar 3,812, nilai  $\Omega_0$  aktual sebesar 1,562, dan nilai  $C_d$  aktual sebesar 3,928.

### SIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini terdapat beberapa poin penting diantaranya :

1. Nilai target perpindahan dengan menggunakan metode ASCE 41-13 sebesar 698,342 mm.
2. Level kinerja struktur hasil analisis *pushover* dengan metode ASCE 41-13 termasuk kedalam tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO).
3. Nilai faktor modifikasi respon aktual  $R = 3,812$  lebih besar dari nilai faktor modifikasi desain  $R = 3,5$ , nilai  $\Omega_0$  aktual sebesar 1,562 lebih kecil dari  $\Omega_0$  desain sebesar 3, nilai  $C_d$  aktual sebesar 3,928 lebih kecil dari  $C_d$  desain sebesar 5,5.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Kami sebagai penulis makalah penelitian ini mengucapkan terima kasih kepada Universitas Jenderal Achamad Yani dan Pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, A. E., Renjith, R., & Isaac, B. M. (2017). Analytical Study on Effect of Geometry of Tall Building on Diagrid Structural Systems Subjected to Lateral Loads. *Applied Mechanics and Materials*, 47-52.
- American Institute of Steel Construction. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. ANSI/AISC 360-10.

- American Society of Structural Engineers. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Others Structures*. ASCE/SEI 7-10.
- Arphita, L. M., Sahana, T. S., & Siddu, K. S. (2016). Comparative Study of Diagrid Structures Over Braced Tube Structures. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 13652-13660.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2015). *SNI 1729-2015 : Spesifikasi untuk Bangunan Baja Struktural*. Jakarta: BSN.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2019). *SNI 1726-2019 :Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Standar Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: BSN.
- Baker, W., Besjak, C., Sarkisian, M., Lee, P., & Doo, C. S. (2010). Proposal Methodology to Determine Seismic Performance Factors for Steel Diagrid Framed System. *13<sup>th</sup> U.S. Japan Workshop*.
- Boake, T. M. (2014). *Diagrid Structures : System, Connection, Details*. Basel: Birkhauser.
- Dewobroto, W. (2005). Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover. *Civil Engineering National Conference : Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism*. Semarang: Unika Soegijapranata.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (200). *FEMA 356 : Pre-Standard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington D. C.: FEMA.
- Fifthariski, K., Yuliarso, H., & Hardiana, A. (2019). Penerapan Prinsip Hi-Tech Architecture Pada Pusat Pelatihan dan Penelitian Pertanian Urban Vertikal di Jakarta. *Jurnal SENTHONG*, 743-754.
- Gopisiddappa, Divashree, M., & Sindhuja, G. J. (2016). Performance Study of High Rise Building with Diagrid System Under Dynamic Loading. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2690-2695.
- Isaac, P. L., & Ipe, B. A. (2017). Comparative Study of Performance of High Rise Building with Diagrid, Hexagrid, and Octagrid System Under Dynamic Loading. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2840-2846.
- Jose, R. (2016). Analysis and Comparison of Diagrid and Conventional Structural System. *International Research Journal of Engineering and Tecnology (IRJET)*, 879-882.
- Moon, K. S. (2009). Design and Construction of Steel Diagrid Structures. *NSCC*, 398-405.
- Moon, K. S. (2011). Diagrid Structures for Complex Shaped Tall Buildings. *Procedia Engineering*, 1343-1350.
- Tavio, & Wijaya, U. (2018). *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja*. Yogyakarta: Penerbit Andi.