

PENGARUH PERKUATAN ELEMEN STRUKTUR TERHADAP KINERJA KEGEMPAAN PADA STRUKTUR BAJA DENGAN SISTEM RANGKA MOMEN KHUSUS

Dony Sulistiono¹, Roesdiman Soegiarso²

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jakarta, Indonesia

Email : sulistionodony@gmail.com

²Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jakarta, Indonesia

Email : roesdimans@pps.untar.ac.id

Masuk: 07-01-2023, revisi: 07-04-2024, diterima untuk diterbitkan: 16-04-2024

ABSTRAK

Berdasarkan *release* oleh BMKG pada tahun 2019, selama rentang waktu tahun 1821-2018, tercatat lebih dari 350 gempa bumi dan tsunami pernah terjadi di wilayah Indonesia. Oleh karena itu penerapan desain struktur tahan gempa merupakan komponen penting untuk diperhatikan. Salah satu material struktur yang dapat digunakan dan sudah diatur dalam tata perencanaan struktur tahan gempa adalah material baja *hot-rolled*. Rekayasa bangunan struktur baja memiliki fleksibilitas dalam menentukan posisi sambungan balok-kolom rigid. Disamping ditinjau dari kekuatannya, material baja memiliki daktilitas yang baik dalam mendisipasi gaya gempa. Sistem struktur penahan gaya gempa pada penelitian ini menggunakan sistem struktur baja pemikul momen khusus. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis performa bangunan dengan mengoptimalkan sumbu kuat kolom *wide flange* sebagai sambungan balok-kolom penahan gaya gempa sedangkan sambungan balok-kolom pada sumbu lemah penampang kolom hanya direncanakan untuk menahan beban gravitasi. Analisis yang digunakan pada penelitian ini yaitu analisis *non-linear time history* dengan 11 rekaman gerak tanah terskala dan analisis *non-linear static pushover* berdasarkan FEMA 440 dan ASCE 41-17. Komponen balok yang mengalami mekanisme sendi plastis pada Langkah awal analisis *pushover* diberikan penguatan dan dievaluasi untuk dinilai pengaruhnya terhadap performa struktur. Klasifikasi kriteria kinerja yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan FEMA 356. Hasil analisis berdasarkan metode FEMA 440 dan ASCE 41-17 dengan memberikan perkuatan balok struktur diperoleh peningkatan performa struktur dari *Life safety* menjadi *Immediate Occupancy*, disamping itu berdasarkan analisis *time history* diperoleh peningkatan kapasitas struktur akan tetapi performa struktur tidak mengalami peningkatan yaitu berada pada level kinerja *Immediate Occupancy*.

Kata Kunci: Struktur Baja Rangka Momen Khusus; FEMA 440; ASCE 41-17; Analisis Non-Linier; Sendi Plastis; Perkuatan Balok Struktur; FEMA 356; *Life Safety*; *Immediate Occupancy*

ABSTRACT

Based on BMKG released in 2019, the event during 1821-2019 is reported more than 350 earthquake and tsunami occurred in Indonesia. Therefore, the structural design according to seismic resisting system shall be strictly implemented by the engineer. One of some material that can be used and regulated by the code is hot-rolled steel material. Structural engineering application of steel structure has a flexibility to determine the position of beam-column rigid connection. Apart from its strength, steel material has adequate ductility in dissipating earthquake forces. The seismic-forces resisting system of this research uses steel special moment frames. The aim of this research is to analyze the structural performance using the major axis of wide flange column as a beam-column rigid joint whereas the minor axis of the column is only defined to resists the gravity loads. This research uses non-linear time history analysis with 11 matched ground motion and pushover analysis based on FEMA 440 dan ASCE 41-17. The early step hinges formed of pushover analysis of the beam components are strengthened and evaluated to obtain the effect on the structural performance. The performance criteria on this research uses FEMA 356. The result based on FEMA 440 and ASCE 41-17 method with beam component strengthening shows that the structure performance increases from Life Safety to Immediate Occupancy, however, the time history analysis result shows structural capacity enhancement but neither with its structure performance criteria is come under Immediate Occupancy.

Keywords: Steel Structure with Special Moment Frames; FEMA 440; ASCE 41-17; Non-Linear Analysis; Plastic Hinged; Beam Strengthening; FEMA 356; *Life Safety*; *Immediate Occupancy*.

1. PENDAHULUAN

Daktilitas struktur memiliki peran yang cukup besar untuk mendisipasi gaya gempa. Pada penelitian ini komponen struktur yang digunakan adalah profil baja *Wide Flange*. Sambungan balok-kolom *rigid* hanya direncanakan pada sisi kuat kolom *wide flange* sedangkan balok pada sisi lemah kolom direncanakan sebagai sambungan geser (*gravity beam*). Komponen penahan gaya gempa diletakan pada bagian tertentu dinilai efektif karena persyaratan kekompakan penampang berdaktilitas tinggi pada ketentuan seismik untuk bangunan gedung baja struktural (SNI 7660, 2020) hanya dipenuhi pada bagian balok-kolom yang *rigid* sedangkan *gravity beam* cukup direncanakan memenuhi persyaratan kekompakan berdasarkan SNI 1729:2020.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kriteria kinerja struktur berdasarkan FEMA 356 dengan melakukan analisis *non-Linear Static Pushover* dan *non-Linear Dynamic Time History* dengan mengevaluasi pengaruh perkuatan pada sistem struktur dengan memberikan perkuatan balok pada bagian yang mengalami plastifikasi pada *step* awal analisis *Pushover*.

2. METODE PENELITIAN

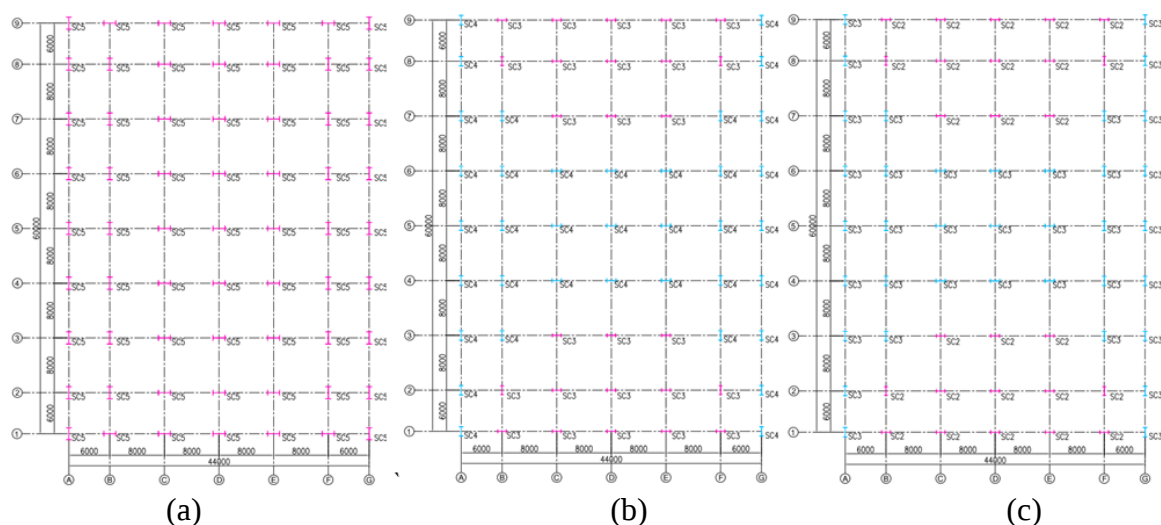
Wilayah kegempaan pada penelitian ini berada di DKI Jakarta dengan fungsi bangunan sebagai perkantoran dengan geometri struktur disajikan pada Gambar 1 sampai Gambar 3 dengan sistem struktur baja pemikul momen khusus menggunakan nilai tegangan leleh minimum (f_y) sebesar 250 MPa dan tegangan tarik ultimit (f_u) sebesar 410 MPa dan rasio tegangan leleh (R_y) dan tarik (R_t) terekspektasi sebesar 1,5 dan 1,2. Kolom dan balok yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3. Pada penelitian ini nilai spektral percepatan di DKI Jakarta diperoleh dari <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id>. Informasi struktur dan parameter gempa yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 4 serta respons spektrum percepatan gempa maksimum (MCE_R) dan gempa desain dengan kala ulang 2500 tahun (DBE) disajikan pada Gambar 6.

Tabel 1 Informasi struktur bangunan

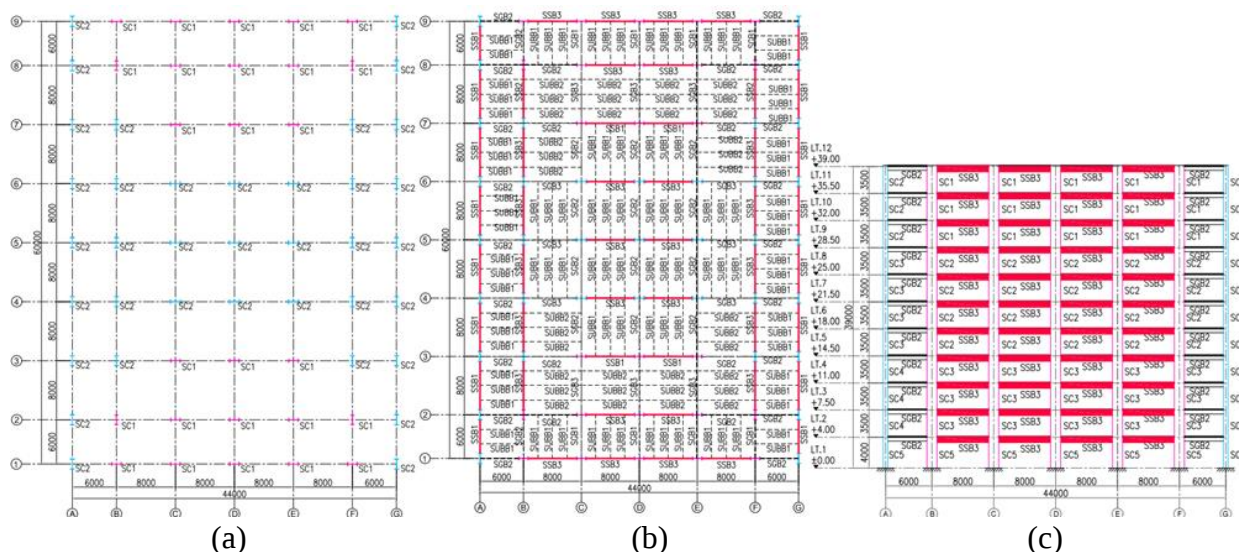
Tinggi bangunan (H_n)	Jumlah lantai	Fungsi bangunan	Sistem Struktur
39 m	12	Perkantoran	Rangka baja Pemikul momen khusus

Tabel 2 Nilai spektral percepatan wilayah DKI Jakarta

PGA (g)	S_s (g)	S_1 (g)	F_A	F_V	S_{DS} (g)	S_{D1} (g)	T_0 (det)	T_s (det)
0,3727	0,7806	0,3823	1,29	2,47	0,67	0,63	0,19	0,94



Gambar 1. Geometri struktur (a) Denah kolom lantai 1, (b) Denah kolom lantai 2-4, (c) Denah kolom lantai 5-8

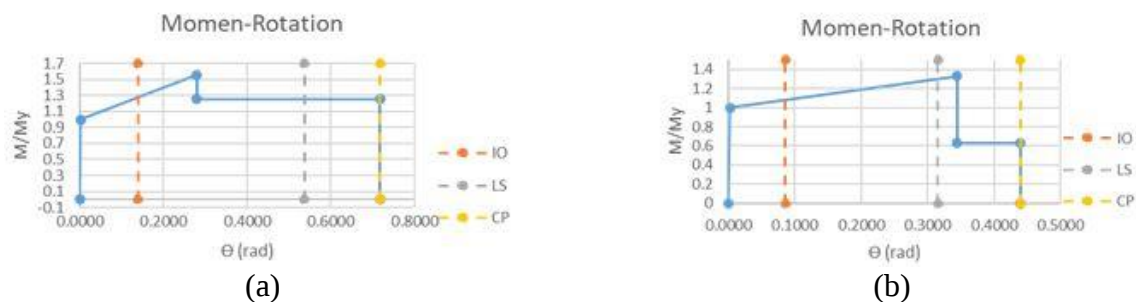


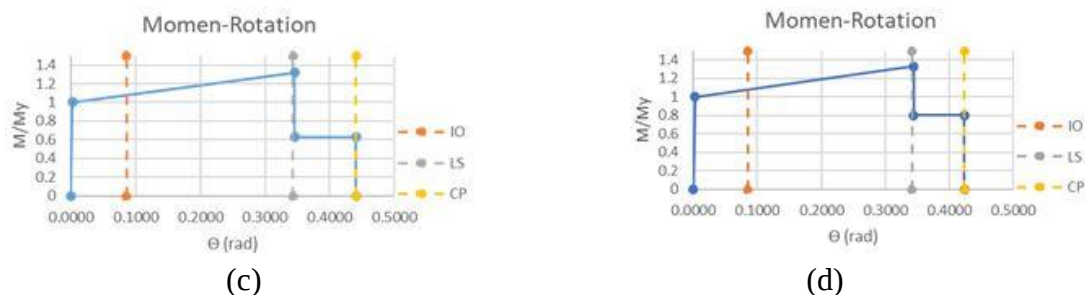
Gambar 2. Geometri struktur (a) Denah kolom lantai 5-8, (b) Denah balok lantai 1-12, (c) Potongan struktur GL-1,9

Tabel 3. Komponen penampang struktur dan batasan kekompakan penampang

Notasi	Member	C_a	$\frac{h}{t_w}$	$\frac{b_f}{2t_f}$	Kategori Member	Batasan	
						Web	Flens
SSB1	BU W 600x300x16x20	0,01	35	7,5	<i>Rigid joint</i>	58,98	9,05
SSB2	BU W 650x300x16x20	0,01	38,13	7,5	<i>Rigid joint</i>	59,02	9,05
SSB3	BU W 700x300x16x24	0,01	40,75	6,25	<i>Rigid joint</i>	59,02	9,05
SGB1	WF 400x200x8x13	-	46,75	7,69	<i>Flexible joint</i>	106,3	10,75
SGB2	WF 500x200x10x16	-	46,8	6,25	<i>Flexible joint</i>	106,3	10,75
SGB3	WF 600x200x11x17	-	51,45	5,88	<i>Flexible joint</i>	106,3	10,75
SUBB1	WF 400x200x8x13	-	46,75	7,69	<i>Flexible joint</i>	106,3	10,75
SUBB2	WF 500x200x10x16	-	46,8	6,25	<i>Flexible joint</i>	106,3	10,75
SC1	BU W 1000x400x26x30	0,12	36,15	6,67	<i>Rigid joint</i>	51,99	9,05
SC2	BU W 1200x500x32x38	0,19	35,13	6,58	<i>Rigid joint</i>	50,67	9,05
SC3	BU W 1300x500x36x40	0,26	33,89	6,25	<i>Rigid joint</i>	49,19	9,05
SC4	BU W 1400x600x38x42	0,23	34,63	7,14	<i>Rigid joint</i>	49,81	9,05
SC5	BU W 1800x800x47x52	0,14	36,09	7,69	<i>Rigid joint</i>	51,58	9,05

Analisis struktur pada penelitian ini menggunakan software Etabs v.19.1.0 dengan melakukan analisis *non-Linear Static Pushover* dan *non-Linear Time History*. Sendi plastis yang terbentuk pada Langkah awal analisis *pushover* akan dievaluasi dengan penambahan perkuatan balok kemudian dinilai kembali kinerja strukturnya. Penelitian yang dilakukan oleh Macedo (2017), diperoleh stabilitas kalibrasi kurva backbone dengan momen-rotasi pada penelitian Lignos dan Krawinkler (2012). Grafik momen-rotasi member balok dan kolom penelitian ini disajikan pada Gambar 4.



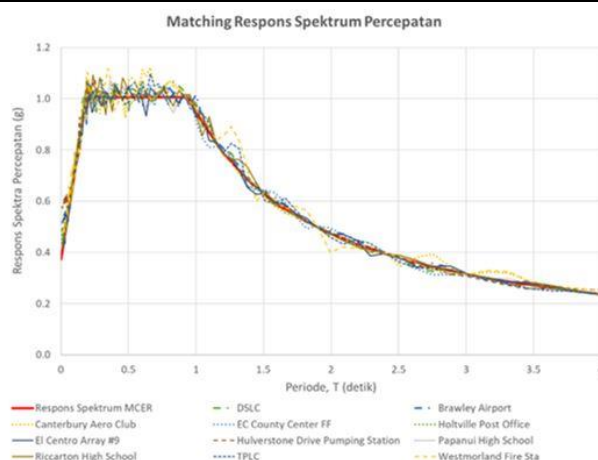


Gambar 4. Grafik hubungan momen-rotasi komponen struktur (a) BU W 600X300X16X20, (b) BU W 650X300X16X20, (c) BU W 700X300X16X24, (d) BU W 850X350X20X26

Pada penelitian studi kasus gedung tinggi yang dilakukan oleh Zhong (2016), direkomendasikan faktor skala maksimum yang digunakan sebesar 5. Menurut tavio (2016), cara terbaik untuk meminimalisir hasil bias pada pemilihan *ground motion* adalah dengan memilih *ground motion* yang akan digunakan secara acak. Menurut Araujo (2016), penggunaan paling sedikit 10 *ground motion* memberikan hasil yang cukup akurat. Pendekatan lain menggunakan *machine learning* yang dilakukan oleh Gholizadeh (2013) dan Kaveh (2020) memberikan hasil yang optimal untuk menentukan performa struktur dari hasil analisis non-linier akan tetapi penggunaan metode ini memerlukan biaya komputasi yang tinggi menurut Nabid (2019). Oleh karena itu pada penelitian digunakan 11 pasang *ground motion* yang memiliki karakteristik gempa yang bervariasi. *Ground motion* yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekaman *Ground Motion* gempa

No	Earthquake Name	Year	Station Name	Magnitude
1	Imperial Valley 06	1995	Brawley Airport	6.53
2	Darfield New Zealand	2010	Canterbury Aero Club	7
3	Darfield New Zealand	2010	DSLCC	7
4	Imperial Valley 06	1999	EC County Center FF	6.53
5	Imperial Valley 02	1940	El Centro Array No.9	6.95
6	Imperial Valley 06	2010	Holtville Post Office	6.53
7	Christchurch New Zealand	2010	Hulverstone Drive Pumping Station	6.2
8	Christchurch New Zealand	2010	Papanui High School	6.2
9	Darfield New Zealand	2010	Riccarton High School	7
10	Darfield New Zealand	2010	TPLC	7
11	Superstition Hills 02	2010	Westmorland Fire Station	6.54



Gambar 5. Penskalaan *ground motion* terhadap Respons Spektrum Percepatan gempa maksimum (MCE_R) DKI Jakarta

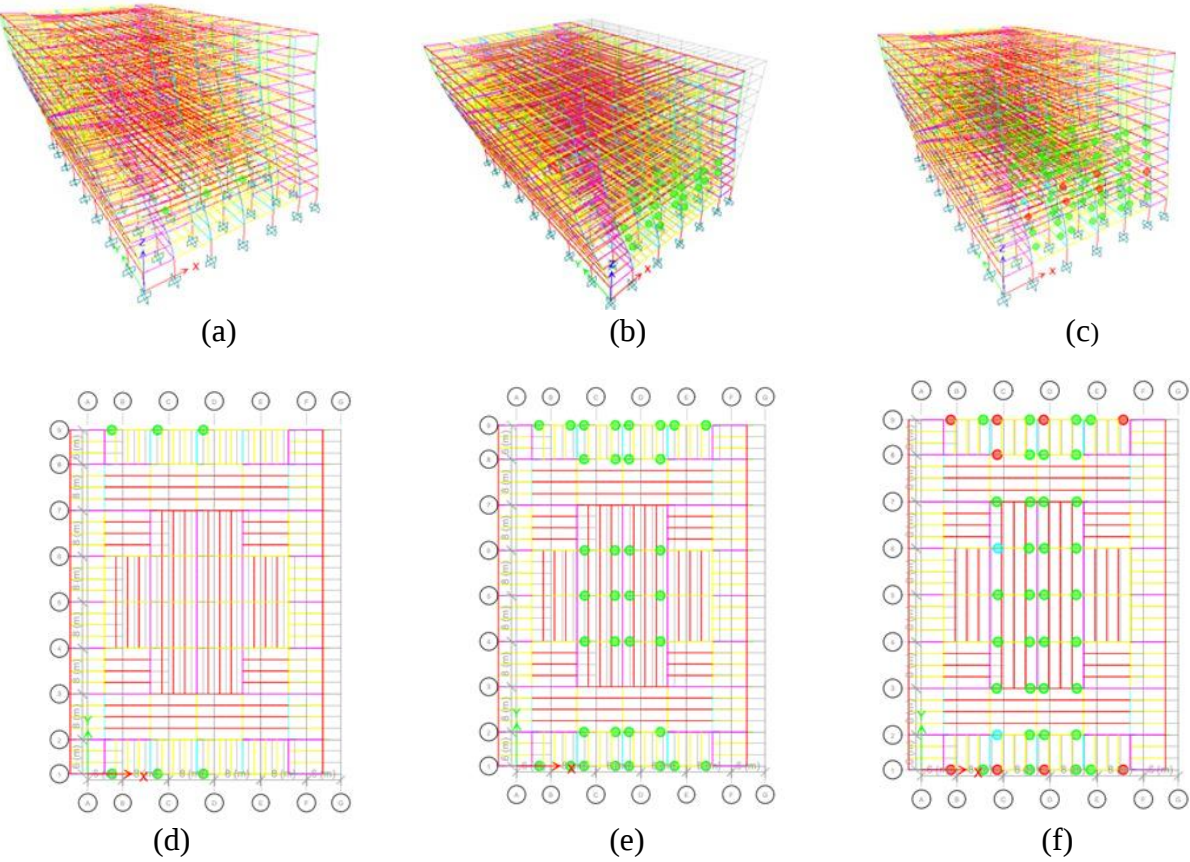
Menurut Wang (2021), *Performance Based Seismic Design* memberikan klarifikasi kinerja yang dimiliki oleh bangunan. Penelitian yang dilakukan Ertanto (2017), Evaluasi kinerja struktur berdasarkan FEMA 356, level kinerja struktur diklasifikasikan menjadi *Operational*, *Immediate Occupancy*, *Life Safety* dan *Collapse Prevention*. Pada penelitian ini, kriteria performa pada sistem struktur baja pemikul momen disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Level Performa dan *Drifts Limit* pada Sistem Struktur Baja Pemikul Momen Khusus

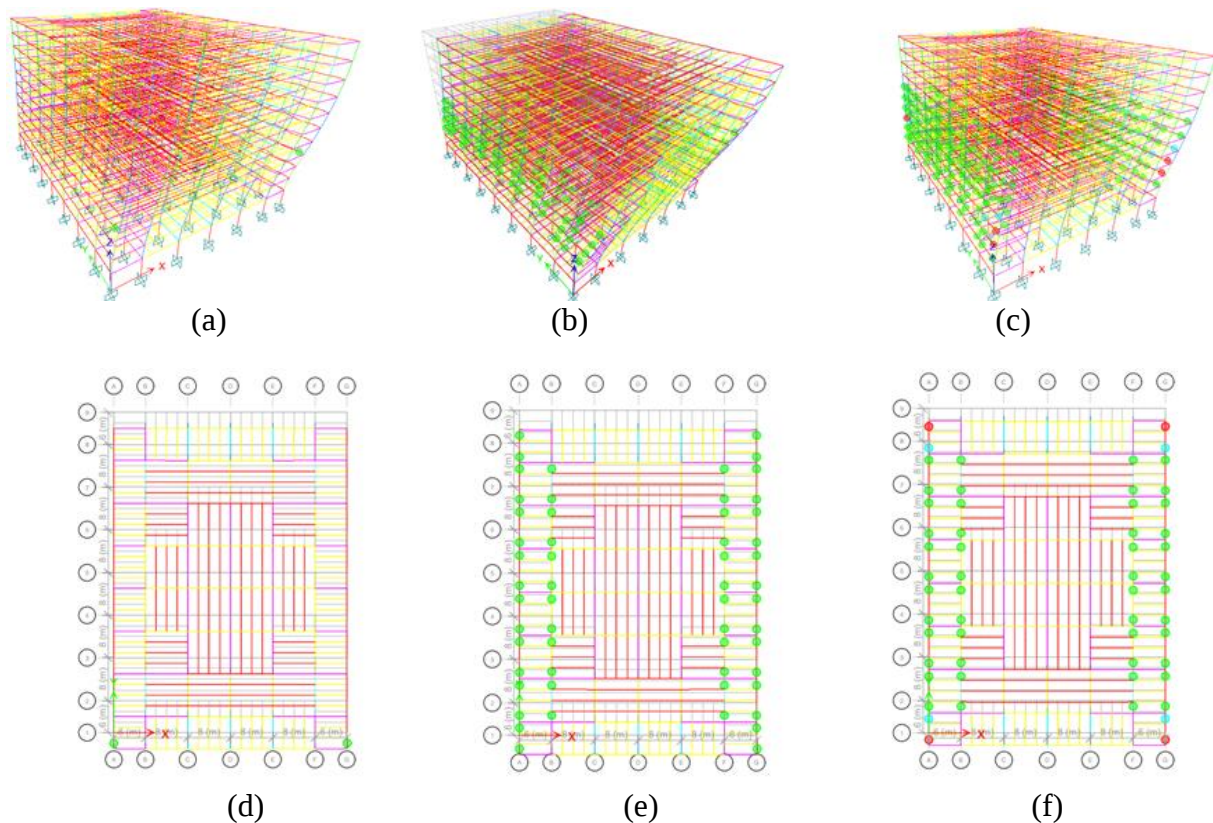
<i>Collapse Prevention</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Immediate Occupancy</i>
Panel balok dan kolom mengalami distorsi yang besar, banyak terjadi kerusakan pada sambungan momen tetapi sambungan geser tetap utuh	Sendi plastis terbentuk, tekuk lokal pada beberapa elemen balok. Beberapa sambungan terdistorsi, beberapa sambungan momen mengalami kerusakan tetapi sambungan geser utuh. Beberapa elemen mengalami kegagalan secara parsial.	Terjadi leleh elemen lokal pada beberapa bagian. Tidak ada kerusakan. Sedikit elemen yang mengalami tekuk atau tampak sedikit distorsi permanen pada member struktur.
Rasio simpangan maksimum : 5 % akibat beban permanen atau sementara	Rasio simpangan maksimum : 1 % akibat beban permanen, 2.5 % akibat beban sementara	Rasio simpangan maksimum : 0.7% akibat beban sementara

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil analisis *pushover* diperoleh hierarki plastifikasi pada struktur yang terjadi pada arah X dan Y yang dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.

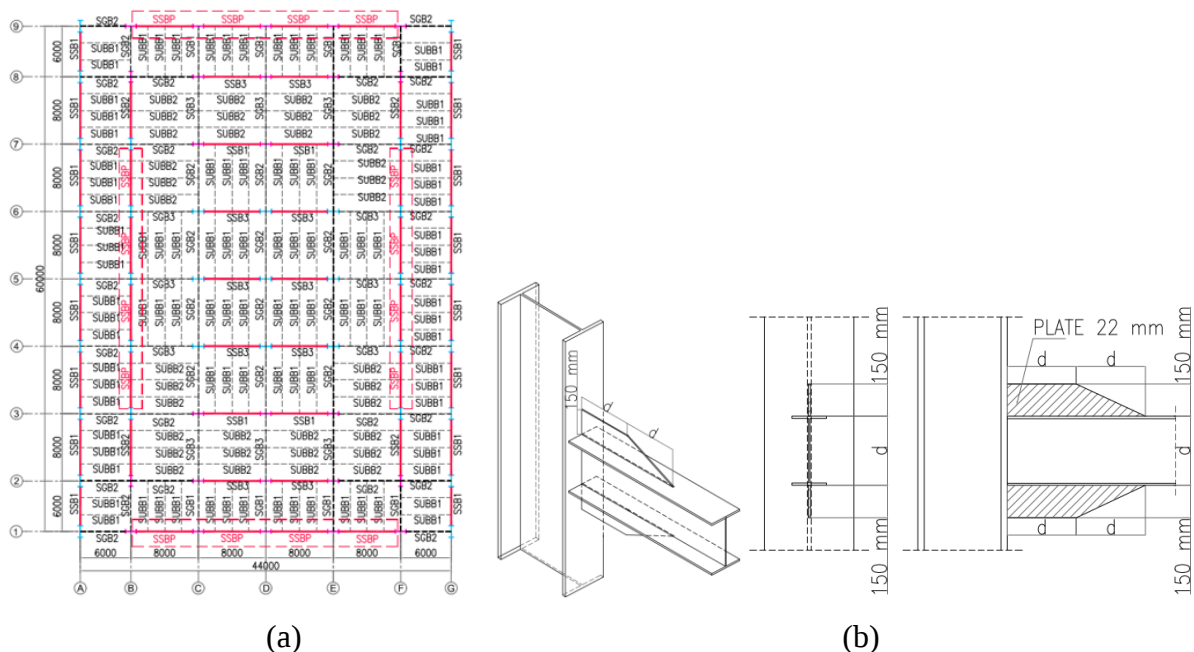


Gambar 6. Mekanisme Plastifikasi Beban *pushover* arah X (a) Langkah ke-6, (b) Langkah ke-7, (c) Langkah ke-17, *Plan view* (d) Pada Langkah ke-6 Lantai 5, (e) Pada Langkah ke-7 Lantai 5, (f) Pada Langkah ke-17 Lantai 5.



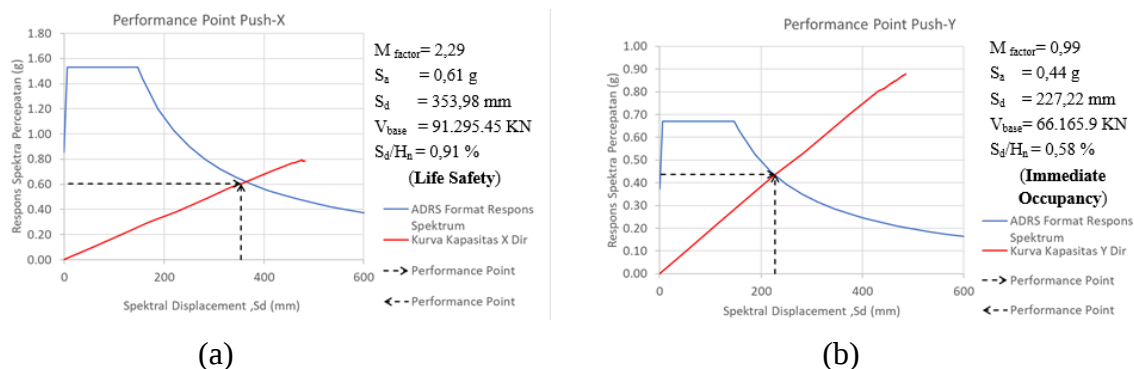
Gambar 7. Mekanisme Plastifikasi Beban *pushover* arah Y (a) Langkah ke-6, (b) Langkah ke-7, (c) Langkah ke-16. (d) Pada Langkah ke-6 *Plan view* Lantai 5, (e) Pada Langkah ke-7 *Plan view* Lantai 5, (f) Pada Langkah ke-16 *Plan view* Lantai 5.

Pada penelitian ini dilakukan perkuatan dengan memberikan pelat baja pengaku dengan tebal 22 mm pada sisi atas dan bawah balok pada lantai 5 dan 6. Denah balok yang diberikan perkuatan disajikan pada Gambar 8. Balok SSBP adalah profil balok BU W 700x300x16x24.

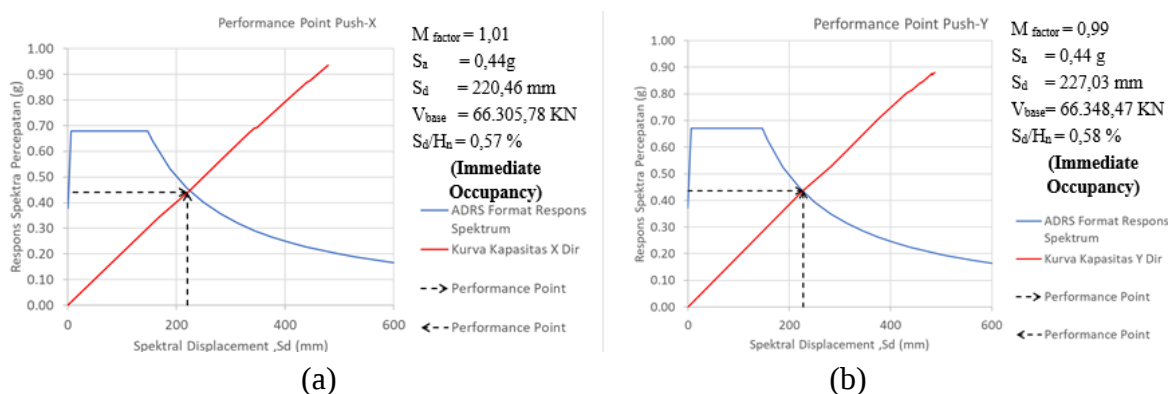


Gambar 8. (a) Denah Balok Lantai 5 - 6 yang diperkuat, (b) Geometri penampang perkuatan balok (SSBP)

Berdasarkan hasil analisis *pushover* dengan metode konversi grafik respons spektrum percepatan dan *displacement* dengan format ADRS berdasarkan FEMA 440 diperoleh *performance point* pada struktur yang disajikan pada Gambar 9 dan gambar 10.

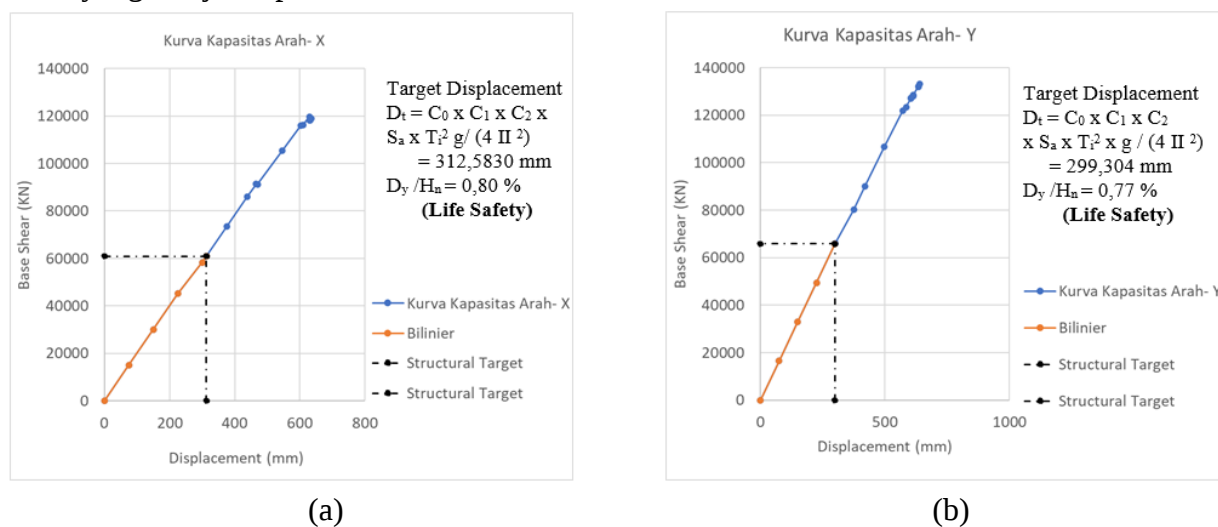


Gambar 9. Grafik *performance point* FEMA 440 (a) *Pushover* arah X, (b) *Pushover* arah Y.

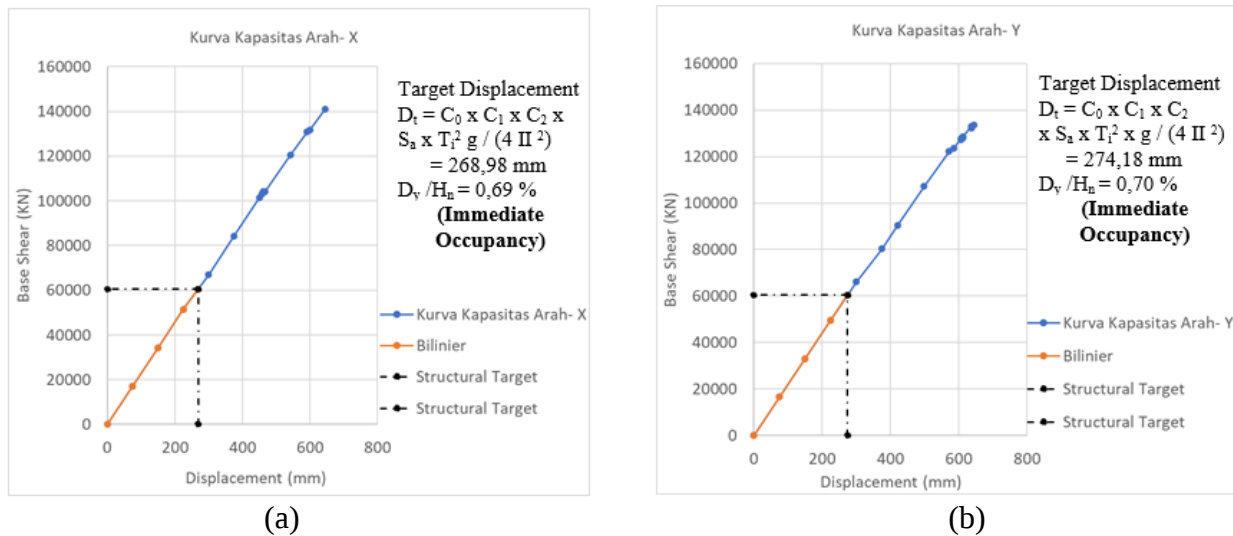


Gambar 10. Grafik *performance point* FEMA 440 setelah dilakukan perkuatan pada komponen balok (a) *Pushover* arah X, (b) *Pushover* arah Y.

Dari hasil analisis *pushover* berdasarkan ASCE 41-17 diperoleh target *displacement* pada arah X dan Y yang disajikan pada Gambar 11 dan Gambar 12.

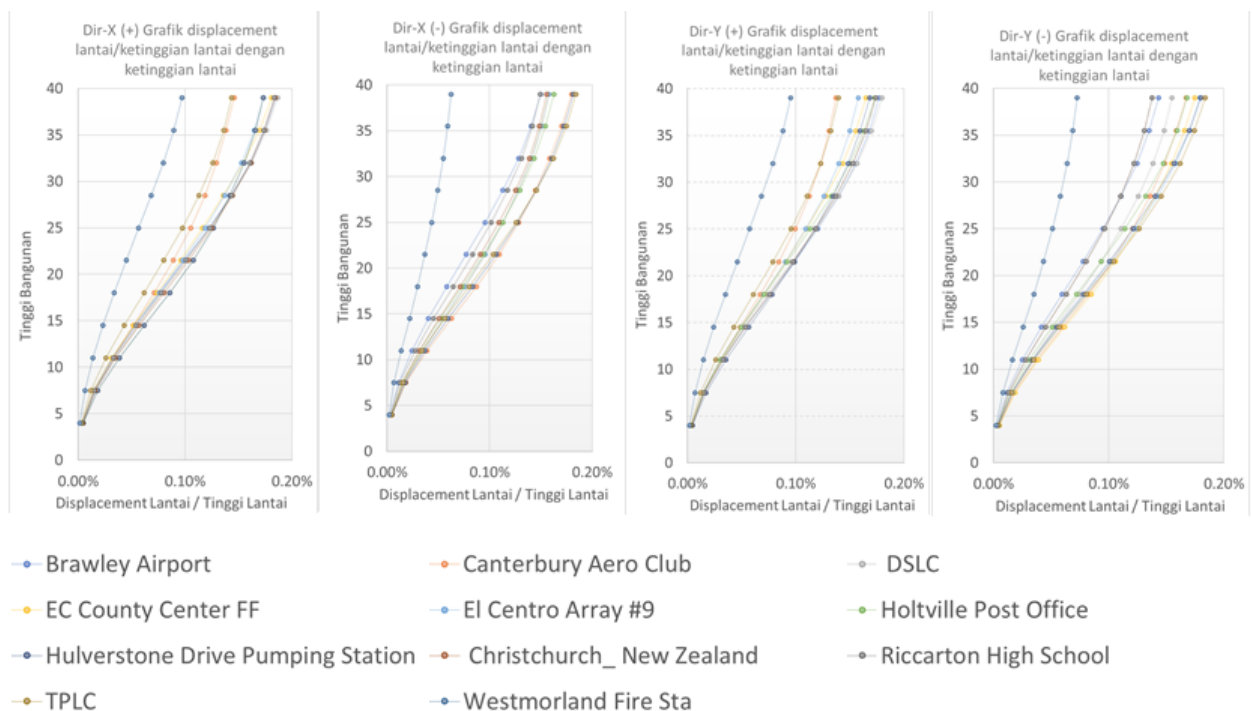


Gambar 11. Grafik *target displacement* ASCE 41-17 (a) *Pushover* arah X, (b) *Pushover* arah Y.

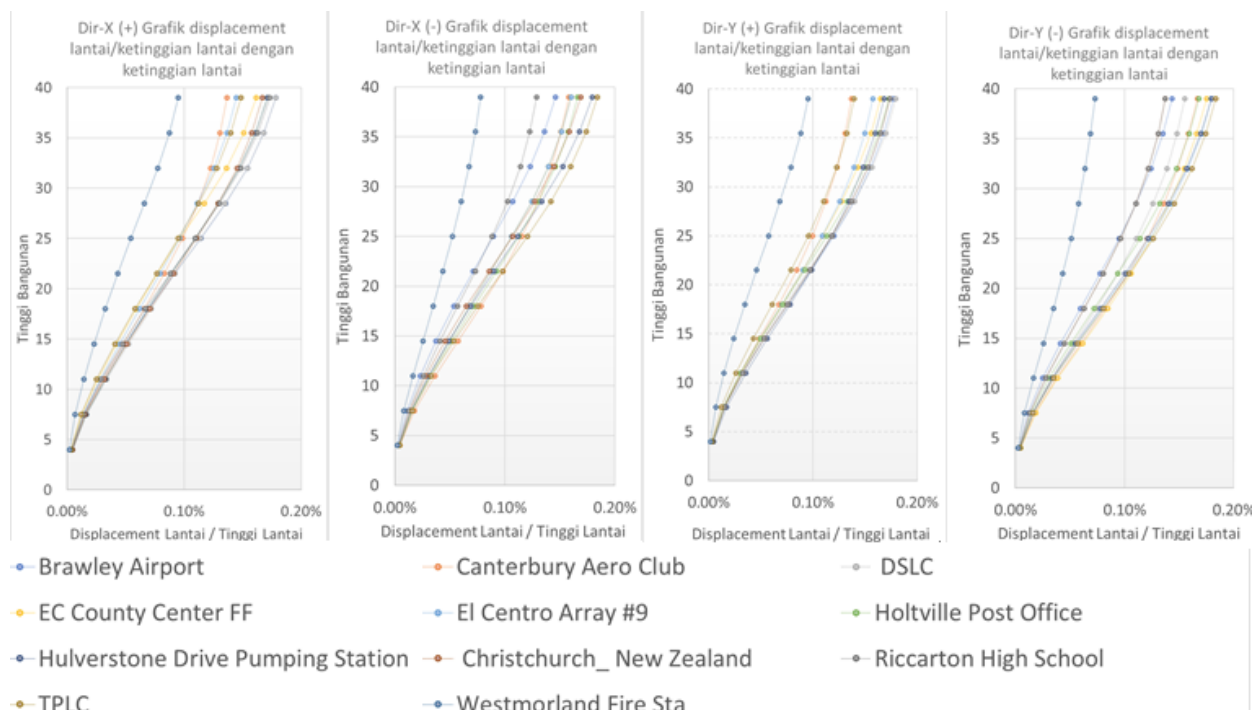


Gambar 12. Grafik *target displacement* ASCE 41-17 setelah dilakukan perkuatan pada komponen balok (a) *Pushover* arah X, (b) *Pushover* arah Y.

Dari hasil analisis *non-Linear Time History* menggunakan 11 pasang rekaman gempa yang diskalakan dengan respons spektrum gempa maksimum (MCE_R). Berdasarkan hasil analisis pada penelitian ini diperoleh rasio maksimum *displacement* dan ketinggian lantai pada arah X dan arah Y pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 13. Grafik rasio *displacement* dan ketinggian lantai



Gambar 14. Grafik rasio *displacement* dan ketinggian lantai setelah dilakukan perkuatan pada komponen balok

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dengan menilai dampak perkuatan balok terhadap evaluasi kinerja struktur berdasarkan rasio simpangan dan tinggi bangunan pada sistem struktur baja pemikul momen berdasarkan FEMA 356 diperoleh hasil analisis sebagai berikut:

1. Pada analisis *pushover* menggunakan metode FEMA 440 diperoleh peningkatan performa struktur dari life safety menjadi *Immediate Occupancy* dengan penurunan nilai rasio displacement struktur terhadap ketinggian total bangunan pada arah X dan Y yang sebelumnya sebesar 0,91% dan 0,59% menjadi 0,57% dan 0,59%.
2. Pada analisis *pushover* menggunakan metode ASCE 41-17 diperoleh peningkatan performa struktur dari life safety menjadi *Immediate Occupancy* dengan penurunan nilai rasio displacement struktur terhadap ketinggian total bangunan pada arah X dan Y yang sebelumnya sebesar 0,80% dan 0,77% menjadi 0,69% dan 0,70%.
3. Pada analisis *time history*, dampak perkuatan pada komponen balok meningkatkan kapasitas struktur akan tetapi tidak terjadi peningkatan performa struktur. Dalam hal ini kriteria kinerja struktur pada sebelum dan sesudah diberikan perkuatan adalah *Immediate Occupancy*.

Untuk memperoleh hasil yang lebih komprehensif pada penelitian selanjutnya maka perlu dilakukan penelitian lanjut berkaitan dengan geometri struktur dengan ketinggian lebih dari 15 lantai, studi pada geometri struktur yang *irregular* dan tinjauan eksperimental untuk mendapatkan nilai *non-linear parameter* yang representatif.

REFERENSI

- Applied Technology Council (ATC-55 Project). (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (FEMA 440). California.
- Araújo, M., Macedo, L., Marques, M. dan Castro, J. M. (2016). Code-based record selection

- methods for seismic performance assessment of buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 45, 129–148.
- ASCE/SEI 41-17. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers. Virginia.
- Ertanto, B. C., Satyarno, I., dan Suhendro, B. (2017). Performance Based Design Bangunan Gedung Untuk Level Kinerja Operasional. *Inersia*, 33, No.2, 13(2).
- Gholizadeh, S., R.Kamyab, dan H.Dadashi. (2013). Performance-based design optimization of steel moment frames. *International Journal of Optimization in Civil Engineering* 2013;3:327–43.
- Kaveh, A., Kabir, M. Z., dan Bohlool, M. (2020). Optimum design of three-dimensional steel frames with prismatic and non-prismatic elements. *Engineering with Computers* 2020, 36, 1011–1027.
- Lignos, D. G., dan Krawinkler, H. (2012). Development and utilization of structural component databases for performance-based earthquake engineering. *Journal of Structural Engineering*, 139, 1382–1394.
- Macedo, L. A. F. R. D. (2017). *Performance-Based Seismic Design and Assessment of Steel Moment Frame Buildings*. Universida Do Porto.
- Nabid, N., Hajirasouliha, I., dan Petkovski, M. (2019). Adaptive low computational cost optimisation method for performance-based seismic design of friction dampers. *Engineering Structures*, 198.
- SNI 1726:2019. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 7660:2020. (2020). Ketentuan Seismik Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 1729:2020. (2020). Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- FEMA 356. (2000). Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356). American Society of Civil Engineers .Virginia.
- Pusat Gempa Bumi dan Tsunami Kedeputan Geofisika Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2019). Katalog Gempa Bumi Signifikan dan Merusak 1821-2018. Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG. Kemayoran-Jakarta.
- P. Zhong. (2016). Ground Motion Simulation Validation for building design and response assessment, *University of California*.
- Tavio, Soegihardjo, H., & Lesmana, Y. (2016). Seismic Behavior of Base-Isolated Residential House with Various Soil Type in High Seismic Regions by Nonlinear Time-History Analysis. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*.
- Wang, Y. (2021). Study on performance-based seismic design theory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 669, 01.