

ANALISIS RIWAYAT WAKTU TERHADAP KINERJA STRUKTUR GEDUNG BAJA BRESING EKSENTRIK (*SPLIT K-BRACES*)

*Erma Desimaliana¹, Altie Santika Arifin², Bildhie Putra Syahrial¹

¹Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Kota Bandung, Indonesia

²PT Dian Widya Enjiniring, Kota Bandung, Indonesia

*)Penulis korespondensi: Erma Desimaliana (ermadesmaliana@itenas.ac.id)

Received: 05 Mei 2026 Revised: 11 Mei 2026 Accepted: 15 Juni 2026

Abstract—Indonesia is located in an area of high seismic activity, necessitating structural systems capable of combining stiffness, strength, and ductility to withstand seismic loads. This study aims to evaluate the seismic performance of a four-story steel school building with a Split K-Braces Eccentrically Braced Frame system through variations in link lengths of 1 m, 2 m, and 3 m. Modeling was performed using ETABS 22 with time-history analysis based on five historical earthquake records: El Centro, Imperial Valley, Morgan Hill, Northridge, and San Fernando. The parameters examined include modal mass participation, structural period, seismic weight, base shear, inter-story drift, P-Delta effects, and structural performance level based on FEMA 356. The analysis results show that all EBF models meet the inter-story drift limits and stability requirements and are classified at the Operational (OP) structural performance level. The model with 1-m links produced the smallest displacement, indicating the highest lateral stiffness, while the model with 3-m links had the lowest effective seismic mass and base shear. This confirms that link length significantly influences the global response of the Split K-Braces steel structure. In terms of efficiency, the 3-m link is the most rational alternative because it still provides safe structural performance with a smaller structural mass and lower seismic demands.

Keywords — steel structure; eccentrically braced frame; Split K-Braces; time history; structural performance

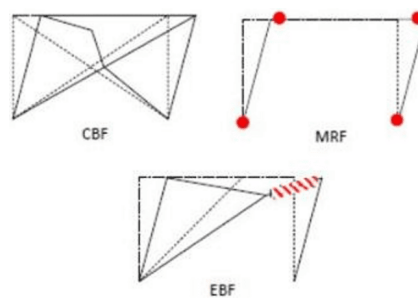
Abstrak—Indonesia berada pada wilayah dengan aktivitas seismik tinggi sehingga diperlukan sistem struktur yang mampu memadukan kekakuan, kekuatan, dan daktilitas dalam menahan beban gempa. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja seismik gedung sekolah baja empat lantai dengan sistem rangka bresing eksentrik (SRBE) tipe Split K-Braces melalui variasi panjang link 1 m, 2 m, dan 3 m. Pemodelan dilakukan menggunakan ETABS 22 dengan analisis riwayat waktu berdasarkan lima rekaman gempa historis, yaitu El Centro, Imperial Valley, Morgan Hill, Northridge, dan San Fernando. Parameter yang ditinjau meliputi partisipasi massa modal, periode struktur, berat seismik, gaya geser dasar, simpangan antar lantai, pengaruh P-Delta, dan tingkat kinerja struktur berdasarkan FEMA 356. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh model SRBE memenuhi batas simpangan antar lantai dan persyaratan stabilitas serta berada pada tingkat kinerja struktur Operational (OP). Model dengan link 1 m menghasilkan perpindahan paling kecil sehingga menunjukkan kekakuan lateral tertinggi, sedangkan model dengan link 3 m memiliki berat seismik efektif dan gaya geser dasar paling rendah. Hal ini menegaskan bahwa panjang link sangat berpengaruh terhadap respons global struktur baja Split K-Braces. Dari segi efisiensi, link 3 m menjadi alternatif yang paling rasional karena tetap memberikan kinerja struktur yang aman dengan massa struktur dan tuntutan gempa yang lebih kecil.

Kata kunci — struktur baja; rangka bresing eksentrik; Split K-Braces; riwayat waktu; kinerja struktur

1. PENDAHULUAN

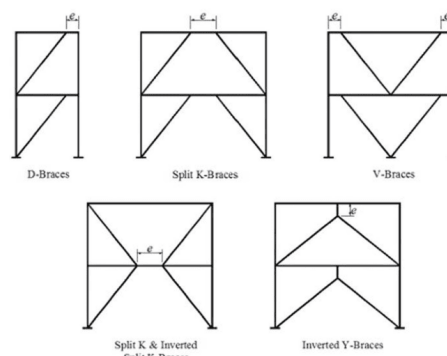
Indonesia memiliki risiko akibat beban seismik yang besar karena berada pada jalur gempa Pasifik (*circum-Pacific earthquake belt*) dan jalur gempa Asia (*trans-Asiatic earthquake belt*). Hal tersebut menyebabkan kemungkinan beban seismik tektonik yang sangat besar; penyebab utamanya yaitu benturan akibat pergeseran lempeng bumi yang menyebabkan pergerakan pada permukaan bumi. Energi yang dihasilkan oleh beban seismik juga menyebabkan getaran yang akan menimbulkan gaya pada bangunan gedung. Gaya yang dihasilkan oleh beban seismik harus dapat ditahan oleh bangunan gedung agar tidak menimbulkan kerugian, terutama korban jiwa. Bangunan gedung harus dirancang tahan terhadap beban seismik agar manusia di dalamnya memiliki waktu yang cukup untuk menyelamatkan diri.

Kondisi geografis Indonesia yang unik membuat pilihan sistem struktur bangunan gedung beragam sehingga disesuaikan dengan lokasi dan kemudahan pelaksanaan. Di daerah yang sulit dijangkau, sistem struktur baja biasanya menjadi pilihan perancangan bangunan gedung. Hal ini dikarenakan relatif lebih mudah pengerjaannya dan lebih cepat, serta memiliki perilaku struktur yang lebih baik. Penggunaan material baja pada struktur bangunan gedung memiliki beberapa jenis alternatif pilihan sistem struktur, di antaranya *moment resisting frame* (MRF) dan *braced frame* (BF) terlihat pada Gambar 1. Sistem MRF atau sistem rangka pemikul momen (SRPM) mempunyai daktilitas tinggi, tetapi umumnya memerlukan dimensi elemen struktural yang lebih besar untuk mencapai kekakuan lateral yang memadai terhadap beban sesimik. Sebaliknya, sistem BF memberikan kekakuan yang lebih besar, namun beberapa konfigurasinya memiliki daktilitas yang kurang baik seperti sistem *Concentric Braced Frame* (CBF) atau sistem rangka bresing konsentrik (SRBK). Sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF) atau sistem rangka bresing eksentrik (SRBE) sering kali digunakan sebagai sistem struktur baja tahan terhadap beban seismik dibandingkan dengan kedua sistem tersebut, karena memiliki kekakuan elastis yang baik dan kapasitas disipasi energi yang tinggi melalui elemen *link*. Pada penelitian ini dipilih SRBE karena memiliki daktilitas yang sangat baik.



Gambar 1. Lokasi sendi plastis pada CBF, MRF, dan EBF

Pada SRBE, elemen *link* didesain sebagai elemen yang akan mengalami deformasi inelastik pertama kali saat diberikan beban seismik sehingga energi akibat beban seismik dapat didisipasikan secara terkendali. Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Wilson dan Suswanto (2017), SRBE memiliki beberapa jenis konfigurasi bresing dan *link* seperti *D-Braces*, *Split K-Braces*, *V-Braces*, *Split K & Inverted Split K-Braces*, dan *Inverted Y-Braces* (Gambar 2). Pada penelitian ini, konfigurasi bresing dan *link* yang diteliti adalah *Split K-Braces*. Konfigurasi ini memberikan distribusi gaya lateral akibat beban seismik yang jelas dan memungkinkan konsentrasi perilaku inelastik pada *link* di tengah bentang. Pada sistem ini, panjang elemen *link* sangat berpengaruh (Jusuf Wilson Meynerd Rafael, 2017). *Link* pendek memiliki kekakuan dan kekuatan yang lebih baik daripada *link* dengan panjang menengah dan *link* panjang berdasarkan perpindahan yang diamati saat struktur bangunan gedung mengalami beban seismik. Selain itu, panjang elemen *link* juga memengaruhi mekanisme keruntuhan pada *link*. Semakin panjang elemen *link*, semakin sulit mekanisme keruntuhan pada *link*. Hal ini disebabkan oleh perilaku *link* yang seperti elemen balok, sehingga penggunaan *link* menjadi kurang efektif.



Gambar 2. Konfigurasi bresing eksentrik

Dalam 10 (sepuluh) tahun terakhir, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kajian mengenai struktur SRBE telah berkembang dari elemen strukturnya saja menuju evaluasi kinerja sistem strukturnya secara global. Bosco et al. (2016) menunjukkan bahwa pemodelan *link beam* berpengaruh langsung terhadap prediksi respons seismik struktur SRBE. Azad dan Topkaya (2017) menegaskan bahwa *link* merupakan elemen pada

struktur SRBE yang menjadi sumber utama disipasi energi dari beban seismik. Bosco et al. (2017) juga mengembangkan prosedur perancangan sistem ganda, yaitu SRBE–SRPM, sedangkan Lian dan Su (2017) menunjukkan bahwa material baja mutu tinggi dapat meningkatkan perilaku SRBE dengan konfigurasi tertentu. Penelitian-penelitian tersebut memperlihatkan bahwa penilaian kinerja struktur SRBE sangat sensitif terhadap parameter perancangan, model numerik, dan konfigurasi bresing dan *link*-nya.

Penelitian lainnya mulai mengkaji konfigurasi spesifik, perilaku *link*, dan evaluasi dinamis. Tian et al. (2018) meneliti perilaku *K-shaped* pada SRBE dengan *shaking table test* dan menganalisis perilakunya menggunakan metode elemen hingga. Bozkurt dan Topkaya (2018) mengembangkan *replaceable link* untuk memudahkan pemulihan struktur SRBE pascagempa. Keivan dan Zhang (2019) mengevaluasi kinerja *self-centering K-type* dan *D-type* pada struktur SRBE, sedangkan Tapia-Hernández dan García-Carrera (2019) mengkaji respons inelastik struktur SRBE yang daktail. Yang et al. (2020) membandingkan kinerja seismik struktur SRBE yang dirancang dengan prosedur konvensional dan *equivalent energy procedure*. Ashrafi dan Imanpour (2021), Mohsenian et al. (2021), Özkılıç, et al. (2021), serta Ramonell dan Chacón (2021) memperluas pembahasan SRBE pada struktur bertingkat, pengaruh beban seismik berurutan terhadap struktur SRBE, *replaceable link* pada struktur SRBE, dan optimasi topologi *link*. Selanjutnya, Ün et al. (2022) mengevaluasi *long links* dengan metodologi FEMA P695, Rezaeian et al. (2022) meneliti *double vertical links*, Lettieri et al. (2023) membahas *self-centering links* yang minim kerusakan, dan Mata et al. (2023) menggunakan *incremental dynamic analysis* untuk struktur SRBE dengan *short links*.

Di Indonesia, penelitian tentang SRBE dan evaluasi kinerja struktur berbasis riwayat waktu juga mulai berkembang meskipun sebagian besar masih berfokus pada perancangan atau perbandingan konfigurasi bresing. Aritonang dan Hayu (2020) mengaplikasikan struktur SRBE pada bangunan apartemen bertingkat. Cari dan Bramantoro (2023) membandingkan konfigurasi bresing eksentris pada struktur gedung baja menggunakan analisis respons spektrum. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi tertentu pada struktur SRBE ternyata memberikan perilaku dinamis yang lebih baik. Kusuma et al. (2025) meninjau optimasi kinerja struktur rangka baja bertingkat SRBE dengan konfigurasi Split-K terhadap pengaruh penempatan bresing. Secara lebih spesifik, Siadari et al. (2024) menunjukkan bahwa analisis riwayat waktu berdasarkan FEMA 356 mampu membedakan tingkat kinerja struktur bangunan gedung akibat pengaruh arah utama struktur. Desimaliana et al. (2025a) memperlihatkan bahwa variasi profil bresing konsentrik tipe *inverted-V* memengaruhi berat seismik efektif, gaya geser dasar, simpangan antar lantai, rasio kapasitas penampang, dan tingkat kinerja struktur. Pada studi lain, Desimaliana et al. (2025b) menunjukkan bahwa analisis riwayat waktu juga efektif untuk menilai kelayakan material alternatif pada gedung *fashion gallery* melalui parameter periode, gaya geser dasar, dan simpangan antar lantai. Meskipun demikian, kajian yang secara khusus menelaah pengaruh variasi panjang *link* pada SRBE tipe Split K-Braces untuk gedung sekolah baja bertingkat rendah masih terbatas. Oleh karena itu, masih terdapat ruang kajian untuk mengevaluasi kinerja struktur gedung sekolah baja bertingkat rendah EBF dengan memvariasikan panjang elemen *link* secara eksplisit, menggunakan analisis riwayat waktu berdasarkan FEMA 356.

Analisis riwayat waktu digunakan dalam penelitian ini karena mampu menghasilkan respons struktur terhadap rekaman gempa aktual secara lebih detail dibandingkan dengan analisis statik ekuivalen atau analisis respons spektrum. Dengan menggunakan pendekatan ini, periode getar struktur, jumlah dan arah ragam getar struktur, distribusi simpangan, gaya geser dasar, serta kecenderungan stabilitas akibat pengaruh P-Delta dapat dievaluasi secara lebih representatif. Penelitian ini juga menggunakan penilaian kinerja berdasarkan FEMA 356 sehingga hasil analisis tidak berhenti pada pemenuhan syarat kekuatan, tetapi mampu menunjukkan level fungsi bangunan setelah terjadi beban sesmik. Bagi bangunan sekolah, informasi ini sangat penting karena target perancangan tidak hanya menghindari keruntuhan, tetapi juga menjaga keberlanjutan operasi bangunan dan memberikan waktu yang cukup untuk melakukan evakuasi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan pada 4 (empat) aspek sekaligus, yaitu objek bangunan gedung baja berfungsi sebagai sekolah dengan total 4 (empat) lantai; penggunaan SRBE dengan konfigurasi *Split K-Braces*; variasi panjang elemen *link* sebesar 1 m, 2 m, dan 3 m, serta evaluasi kinerja struktur berdasarkan FEMA 356 menggunakan analisis riwayat waktu dengan 5 (lima) rekaman gempa historis. Dengan kata lain, penelitian ini tidak hanya ingin membandingkan bentuk atau konfigurasi bresing, tetapi juga secara spesifik ingin mengevaluasi pengaruh panjang elemen *link* terhadap perilaku global struktur SRBE. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi panjang elemen *link* terhadap jumlah dan arah ragam getar struktur, periode getar struktur, berat seismik efektif, gaya geser dasar, simpangan antarlantai, pengaruh P-Delta, tingkat kinerja struktur, serta untuk menentukan alternatif konfigurasi struktur

SRBE yang paling rasional diaplikasikan dalam perencanaan gedung sekolah baja di wilayah rawan gempa, khususnya Indonesia.

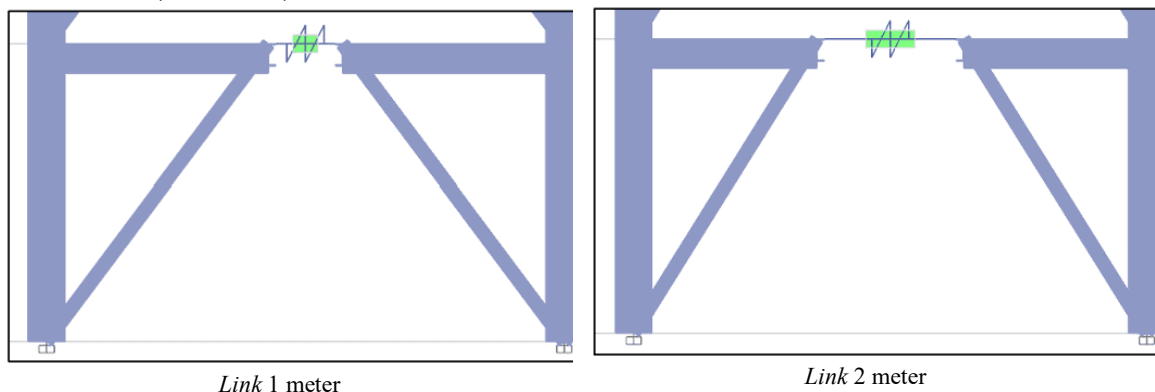
2. METODE

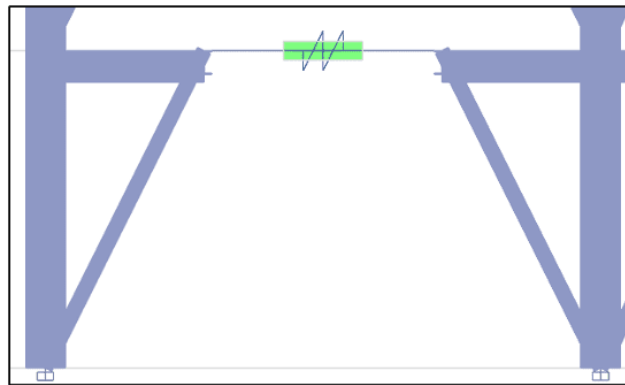
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan numerik. Objek kajian berupa gedung sekolah berstruktur baja 4 (empat) lantai di Kota Makassar berada pada kelas situs tanah sedang (SD). Sistem penahan gaya lateral yang digunakan adalah sistem rangka bresing eksentrik (SRBE) konfigurasi *Split K-Braces* dengan 3 (tiga) variasi panjang link, yaitu 1 m, 2 m, dan 3 m (Gambar 3). Pemodelan 3D (Gambar 4) dan analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS 22. Material baja yang digunakan adalah BJ 50 dengan tegangan leleh (f_y) sebesar 290 MPa dan tegangan putus (f_u) sebesar 500 MPa untuk profil balok, kolom dan bresing. Material beton yang digunakan adalah $f_c = 28$ MPa dan material baja ringan yang digunakan adalah G550 untuk pelat lantai. Elemen struktur utama yang dimodelkan meliputi kolom, balok induk, balok anak, pelat lantai, dan bresing. Tabel 1 memperlihatkan data tipe dan dimensi elemen struktur utama pada bangunan gedung sekolah 4 lantai.

Tabel 1. Tipe dan Dimensi Elemen Struktural

No.	Balok Induk		Balok Anak		Kolom	
	Tipe	Profil	Tipe	Profil	Tipe	Profil
1	BI-1	IWF 450.375.12.25	BA-1	IWF 350.200.12.19	K-1	H-Beam 500.500.19.32
2	BI-2	IWF 400.250.12.25	BA-2	IWF 300.250.9.16	K-2	Hollow 500.500.30
3	BI-3	IWF 300.300.9.16	BA-3	IWF 300.200.9.16		
	Bresing		Pelat			
4	B	Hollow 180.180.10	PL	Steel deck t = 7 mm Beton t = 120 mm		

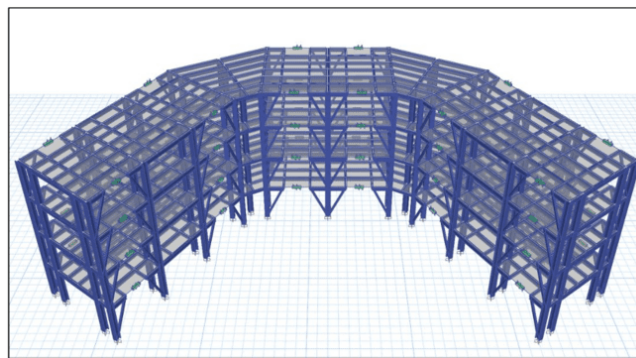
Analisis kinerja struktur SRBE dengan konfigurasi *K-Split Braces* ini berdasarkan SNI 1726:2019 untuk ketahanan gempa, SNI 1727:2020 untuk pembebanan minimum, SNI 1729:2020 untuk spesifikasi bangunan gedung baja struktural, AISC 341-16 untuk ketentuan seismik baja, serta FEMA 356 untuk penentuan tingkat kinerja. Beban yang diperhitungkan dalam pemodelan pada software ETABS adalah beban mati, beban mati tambahan, beban hidup, dan beban gempa. Data percepatan gempa masukan menggunakan lima rekaman gempa historis, yaitu El-Centro (Gambar 5), San Fernando (Gambar 6), Imperial Valley (Gambar 7), Morgan Hill (Gambar 8), dan Northridge (Gambar 9), yang dipilih dan disesuaikan dengan respons spektrum desain Kota Makassar (Gambar 10).



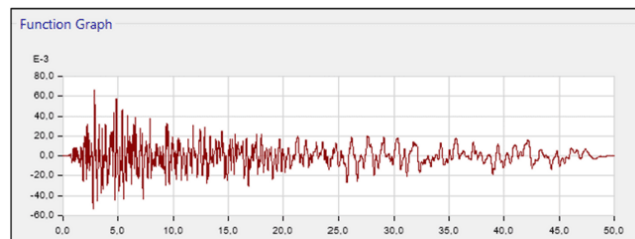


Link 3 meter

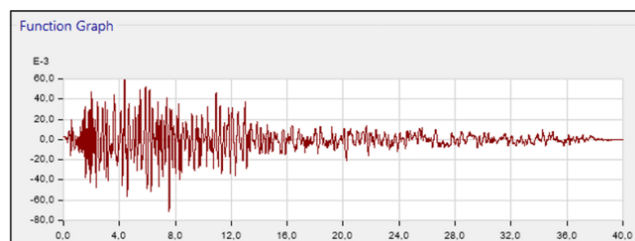
Gambar 3. Variasi panjang elemen link



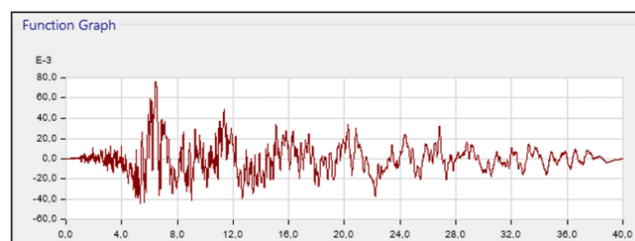
Gambar 4. Pemodelan 3D pada software ETABS



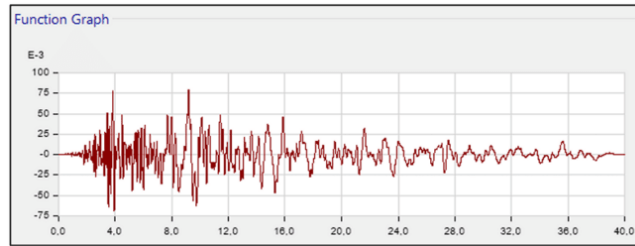
Gambar 5. Gempa El-Centro 1942



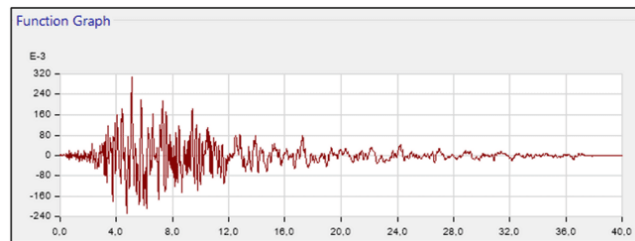
Gambar 6. Gempa San Fernando 1971



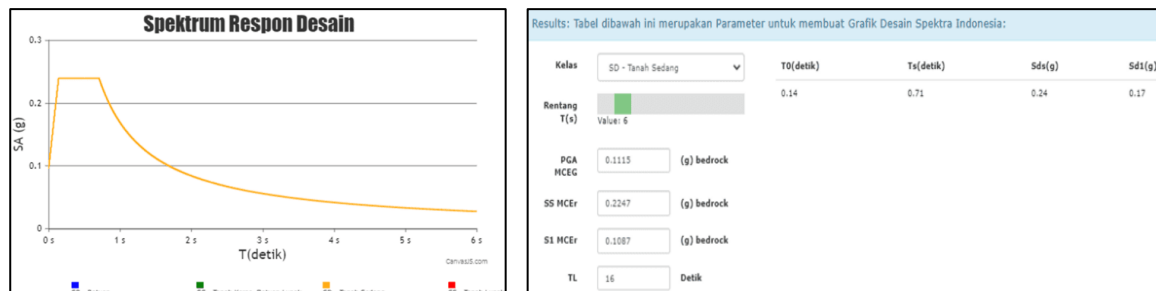
Gambar 7. Gempa Imperial Valley 1979



Gambar 8. Gempa Morgan Hill 1984



Gambar 9. Gempa Northridge 1994

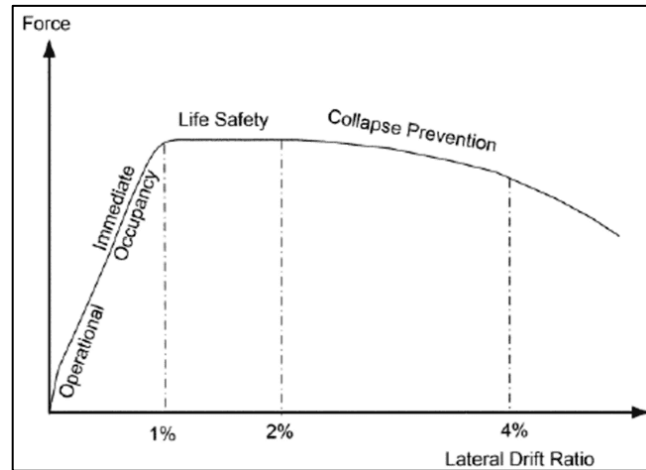


Gambar 10. Respons spektrum desain Kota Makassar

Evaluasi dilakukan pada parameter analisis struktur berupa periode getar struktur yang dominan, jumlah dan arah rahan getar struktur, berat seismik efektif, gaya geser dasar seismik, simpangan antar lantai, pengaruh P-Delta, dan tingkat kinerja struktur. Gaya geser dasar dihitung berdasarkan hubungan antara percepatan beban seismik desain, koefisien respons seismik dan berat seismik efektif, serta faktor lainnya seperti kelas situs dan periode getar struktur. Sementara itu, pemeriksaan simpangan antar lantai dilakukan karena gaya seismik lateral akan menghasilkan simpangan struktur dalam arah lateral sehingga simpangan antar lantai harus selalu diperiksa untuk menjamin stabilitas struktur, mencegah kerusakan masif pada elemen nonstruktural, serta menjamin kenyamanan. Simpangan antar lantai dipengaruhi faktor pembesaran defleksi dan faktor keutamaan struktur. Pengaruh P-Delta dinilai melalui koefisien stabilitas, dan tingkat kinerja struktur ditentukan berdasarkan *lateral drift ratio* sesuai dengan kriteria FEMA 356 (Gambar 11). Seluruh hasil parameter analisis struktur kemudian dibandingkan untuk melihat pengaruh perubahan panjang elemen *link* terhadap perilaku global struktur.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan struktur bangunan gedung SRBE tipe *Split-K-Braces* dengan variasi 3 (tiga) panjang elemen *link* menggunakan perangkat lunak ETABS. Selanjutnya, respons struktur bangunan gedung SRBE tipe *Split-K-Braces* masing-masing dianalisis berdasarkan SNI 1726:2019, sedangkan tingkat kinerjanya dianalisis berdasarkan FEMA 356. Analisis struktur dimulai dari pemeriksaan periode, gaya geser dasar, simpangan antar lantai, pengaruh P-Delta, dan tingkat kinerja.



Gambar 11. Tingkat kinerja struktur berdasarkan FEMA 356

3.1 Periode, Jumlah, dan Arah Ragam Getar Struktur

Analisis *modal* menunjukkan bahwa ketiga model mampu mencapai partisipasi massa ragam terkomposisi sebesar 100% pada mode ke-12 (Tabel 2). Hasil ini menunjukkan bahwa jumlah ragam yang digunakan telah memadai untuk merepresentasikan perilaku dinamis struktur yang sesuai dengan SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.1. Mode dominan struktur terjadi pada arah X, dengan besaran periode struktur yang terus meningkat sejalan dengan penambahan panjang link. Periode getar yang terjadi adalah 0,575 s pada struktur dengan *link* 1; selanjutnya 0,622 s pada struktur dengan *link* 2 m; dan 0,649 s pada struktur dengan panjang *link* 3 m. Pada arah Y, ditemukan fenomena yang sama, yaitu meningkatnya periode getar struktur yang sejalan dengan penambahan panjang *link*, yaitu 0,389 s menjadi 0,455 s dan 0,504 s untuk panjang *link* 1 m, 2 m, dan 3 m secara berurutan. Kenaikan periode getar struktur ini konsisten dengan berkurangnya kekakuan lateral ketika panjang *link* diperbesar. Dengan demikian, variasi panjang *link* terbukti memengaruhi karakteristik dinamis awal bangunan bahkan sebelum respons *nonlinear* dievaluasi.

Tabel 2. Periode getar SRBE dengan variasi panjang link

Mode	Link 1 meter				Link 2 meter				Link 3 meter			
	T (s)	UX	UY	RZ	T (s)	UX	UY	RZ	T (s)	UX	UY	RZ
1	0,575	0,448	0	0,379	0,622	0,452	0	0,366	0,649	0,460	0	0,354
2	0,389	0	0,832	0	0,455	0	0,824	0	0,504	0	0,816	0
3	0,303	0,388	0	0,458	0,365	0,371	0	0,465	0,415	0,356	0	0,470
4	0,180	0,064	0	0,053	0,191	0,068	0	0,053	0,197	0,070	0	0,053
5	0,127	0	0,114	0	0,144	0	0,116	0	0,156	0	0,121	0
6	0,101	0,036	0	0,068	0,119	0,047	0	0,063	0,131	0,049	0	0,065
7	0,098	0,037	0	0,010	0,101	0,028	0	0,019	0,103	0,028	0	0,021
8	0,071	0	0,041	0	0,078	0	0,046	0	0,082	0	0,049	0
9	0,067	0,007	0	0,008	0,069	0,005	0	0,011	0,071	0,018	0	0,027
10	0,059	0,018	0	0,018	0,066	0,023	0	0,018	0,069	0,012	0	0,004
11	0,050	0	0,013	0	0,053	0	0,015	0	0,054	0	0,015	0
12	0,043	0,006	0	0,006	0,046	0,007	0	0,006	0,048	0,007	0	0,007
Σ		1	1	1		1	1	1		1	1	1

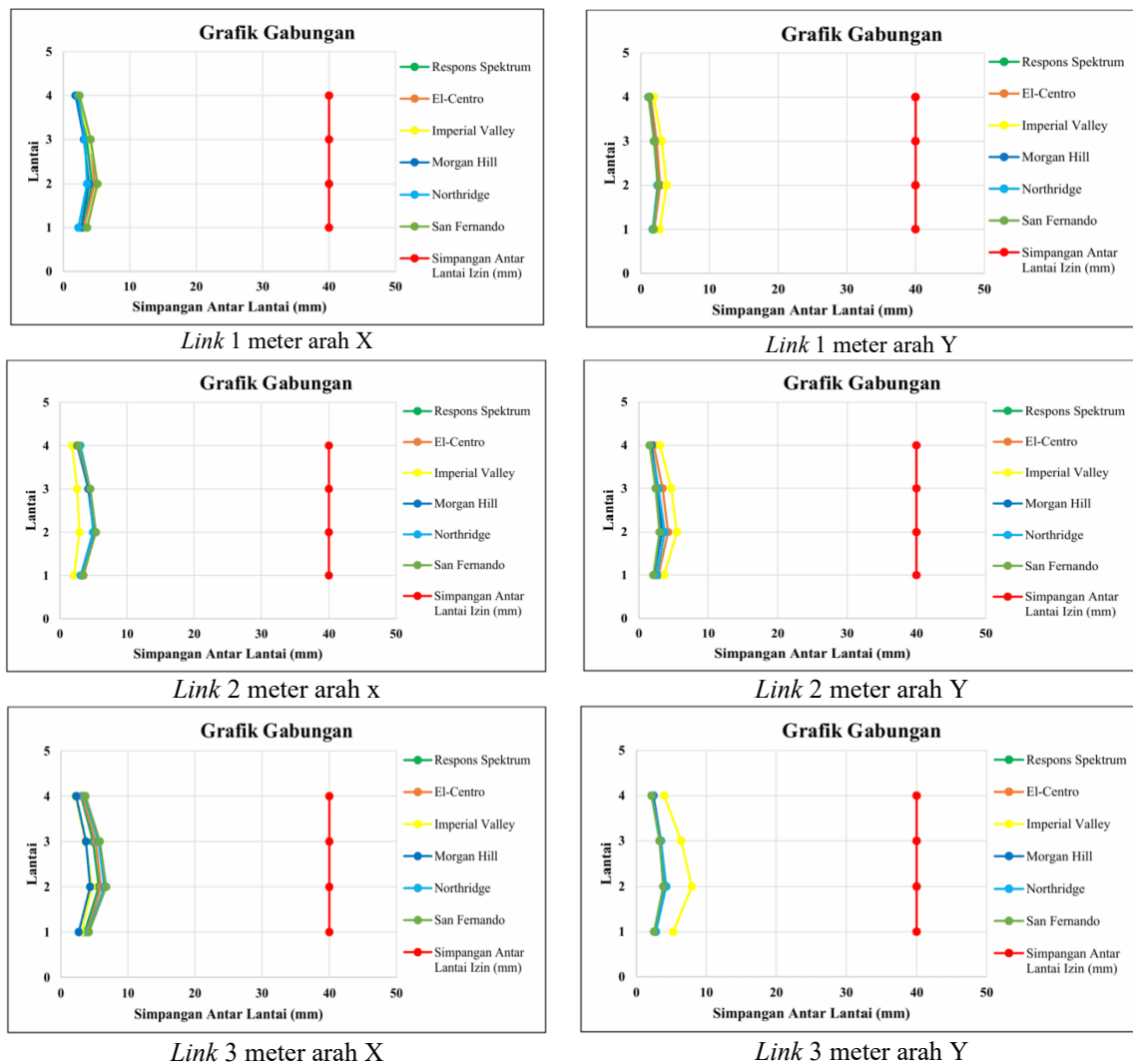
3.2 Gaya Geser Dasar

Berat seismik efektif dan gaya geser dasar SRBE juga dipengaruhi oleh variasi panjang elemen *link*. Berat seismik efektif mengalami penurunan dari 20.176,549 kN pada model *link* 1 m menjadi 19.970,499 kN pada model *link* 2 m dan 19.775,616 kN pada model *link* 3 m. Penurunan berat seismik efektif ini juga diikuti oleh penurunan gaya geser dasar dari 906,734 kN pada model *link* 1 m menjadi 897,474 kN pada model *link* 2 m dan 888,716 kN pada model *link* 3. Hal ini sesuai dengan pembahasan sebelumnya, di mana struktur SRBE juga mengalami kenaikan periode getarnya. Pada struktur SRBE dengan *link* 1 m struktur menjadi lebih kaku terlihat dari nilai periode getar strukturnya yang pendek maka gaya geser dasar menjadi lebih besar. Selanjutnya,

pada struktur SRBE dengan panjang *link* 2 m, gaya geser dasar cenderung turun namun kekakuan strukturnya menjadi relatif lebih rendah. Pada struktur SRBE dengan *link* sepanjang 3 m, perilaku strukturnya menjadi lebih fleksibel sehingga menyebabkan periode getar struktur menjadi lebih panjang dan gaya geser dasarnya lebih kecil. Hal ini dikarenakan struktur SRBE berada pada respons spektrum beban seismik saat periode panjang.

3.3 Simpangan Antar Lantai

Sementara itu, hasil evaluasi simpangan antar lantai menunjukkan kecenderungan yang berlawanan dengan gaya geser dasar namun hal ini sesuai dengan perilaku struktur yang dianalisis. Model *link* 1 m menghasilkan perpindahan maksimum paling kecil, yaitu 5,702 mm; diikuti link 2 m sebesar 6,310 mm; dan link 3 m sebesar 8,852 mm. Analisis simpangan antar lantai juga dilakukan menggunakan rekaman gempa El-Centro, Imperial Valley, Morgan Hill, San Fernando dan Northridge. Hasil analisis simpangan antar lantai menunjukkan bahwa nilai maksimum terdapat pada gempa Northridge, yaitu berkisar antara 2,187 mm hingga 3,579 mm di arah X; sedangkan di arah Y berkisar antara 1,144 mm hingga 2,512 mm untuk model *link* 1 m. Seluruh nilai tersebut jauh di bawah batas simpangan izin 40 mm per lantai. Hasil gabungan seluruh rekaman gempa dalam penelitian ini juga menunjukkan bahwa ketiga variasi model memenuhi syarat simpangan antar lantai desain (Gambar 12). Temuan ini memperlihatkan bahwa seluruh model masih aman. Model *link* pendek memberikan perpindahan yang lebih baik karena kekakuan lateral dan kekakuan strukturnya secara global lebih kaku dibandingkan dengan 2 model lainnya.



Gambar 12. Variasi panjang elemen link

3.4 Pengaruh P-Delta

Berdasarkan SNI 1726:2019, pengaruh P-Delta pada gaya geser tingkat dan momen elemen struktur yang dihasilkan oleh simpangan antar lantai tidak perlu diperhitungkan apabila koefisien stabilitas (θ) lebih besar dari 0,1 namun kurang dari $\theta_{maksimum}$. Jika nilai koefisien stabilitas lebih dari koefisien stabilitas maksimum, maka struktur SRBE berpotensi tidak stabil dan diperlukan untuk dirancang ulang. Nilai koefisien stabilitas akibat pengaruh P-Delta berturut-turut adalah 0,0033 pada *link* 1 m; 0,0037 pada *link* 2 m; dan 0,0051 pada *link* 3 m. Seluruh nilai tersebut tetap berada di bawah batas yang disyaratkan untuk perancangan ulang, sehingga dapat disimpulkan bahwa struktur SRBE masih stabil untuk ketiga konfigurasi panjang elemen *link*.

3.5 Tingkat Kinerja Struktur

Evaluasi kinerja SRBE lebih lanjut menggunakan FEMA 356 (Tabel 3) ternyata memperlihatkan bahwa semua model berada pada tingkat kinerja *Operational* (OP). Artinya, setelah menerima beban seismik rencana, bangunan gedung sekolah SRBE masih dapat berfungsi secara normal tanpa kerusakan (struktural dan non struktural) signifikan yang menuntut perbaikan besar. Hasil ini penting untuk bangunan gedung sekolah karena target kinerja fungsional menjadi bagian dari tuntutan desain berbasis performa.

Tabel 3. Tingkat kinerja SRBE dengan variasi panjang elemen *link*

Gempa	Arah	h_{total} (m)	Link 1 meter			Link 2 meter			Link 3 meter		
			δ_t (m)	Drift Ratio (%)	Tingkat Kinerja	δ_t (m)	Drift Ratio (%)	Tingkat Kinerja	δ_t (m)	Drift Ratio (%)	Tingkat Kinerja
El-Centro	X	16	0,036	0,226	OP	0,037	0,230	OP	0,040	0,253	OP
	Y		0,038	0,235		0,038	0,239		0,042	0,260	
San Fernando	X		0,035	0,221		0,041	0,253		0,041	0,255	
	Y		0,038	0,239		0,042	0,260		0,040	0,251	
Imperial Valley	X		0,040	0,251		0,040	0,252		0,041	0,253	
	Y		0,038	0,239		0,037	0,230		0,040	0,251	
Morgan Hill	X		0,035	0,221		0,040	0,251		0,040	0,253	
	Y		0,040	0,251		0,038	0,235		0,040	0,251	
Northridge	X		0,042	0,260		0,040	0,251		0,041	0,254	
	Y		0,039	0,244		0,042	0,260		0,041	0,254	

Dengan analisis yang menyeluruh, muncul 2 (dua) kecenderungan utama, yaitu *link* yang lebih pendek meningkatkan kekakuan dan menurunkan perpindahan. Kedua, *link* yang lebih panjang menurunkan berat seismik dan gaya geser dasar. Hasil analisis ini juga menunjukkan bahwa *link* pendek cenderung lebih efektif dalam mengendalikan perpindahan, dan mempertahankan struktur bangunan SRBE berada pada periode getar struktur yang lebih pendek dengan memiliki kekakuan yang relatif lebih besar dibandingkan dengan struktur bangunan dengan *link* yang lebih panjang.

Pemilihan panjang elemen *link* harus disesuaikan dengan kebutuhan perancangan bangunan gedung dan parameter analisis struktur capaian yang dituju. Jika sasaran utama adalah pembatasan perpindahan lateral, maka *link* 1 m lebih disarankan karena memberikan perpindahan paling kecil. Namun, apabila sasaran perancangan adalah efisiensi massa dan penurunan gaya seismik, maka *link* 3 m menjadi pilihan yang lebih efektif selama target tingkat kinerja struktur tetap terpenuhi. Pada penelitian ini, seluruh model struktur SRBE masih berada pada tingkat kinerja *Operational* (OP), maka rekomendasi penggunaan *link* dengan panjang 1 m, 2 m, maupun 3 m masih dapat digunakan dengan perilaku struktur yang ingin dicapai. Kesimpulan tersebut memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih terukur bagi perancang dalam memilih konfigurasi SRBE untuk bangunan gedung sekolah di wilayah rawan terhadap beban seismik terutama di Indonesia.

4. KESIMPULAN

Variasi panjang *link* pada struktur SRBE konfigurasi *Split K-Braces* berpengaruh nyata terhadap respons global gedung sekolah berstruktur baja. Peningkatan panjang *link* dari 1 m menjadi 3 m menyebabkan periode getar struktur bertambah, sehingga menunjukkan terjadinya penurunan kekakuan lateral. Pada saat yang sama, berat seismik efektif dan gaya geser dasar juga menurun sehingga tuntutan beban seismik pada struktur SRBE menjadi lebih kecil.

Seluruh model yang dianalisis memenuhi batas simpangan antar lantai, memenuhi persyaratan stabilitas terhadap pengaruh P-Delta, dan berada pada tingkat kinerja *Operational* (OP) menurut FEMA 356. Model *link* 1 m memberikan perpindahan maksimum paling kecil sehingga paling efektif untuk mengendalikan perpindahan, karena elemen *link* berperilaku sebagai *link* geser yang memiliki mekanisme kegagalan geser. Model *link* dengan panjang 2 m memberikan perilaku *link* yang geser dan lentur sehingga memiliki perilaku yang lebih fleksibel dibandingkan dengan model yang memiliki link dengan panjang 1 m. Perilaku *link* yang merupakan kombinasi geser dan lentur ini tidak memiliki kapasitas yang optimum untuk mendisipasikan beban seismik lateral yang disalurkan. Serta, pada model dengan panjang *link* 3 m, *link* ternyata memiliki mekanisme kegagalan lentur yang hampir sama dengan struktur SRPM (atau berperilaku seperti balok) di mana sendi plastis muncul pertama kali pada ujung *link* sehingga struktur SRBE model ini menjadi lebih fleksibel dengan deformasi yang lebih besar di antara 2 model lainnya. Namun, dari penelitian yang telah dilakukan, seluruh model masih memenuhi persyaratan yang digunakan, sehingga pemilihan panjang elemen *link* kembali pada tujuan perancangan yang akan dicapai.

DAFTAR PUSTAKA

- AISC. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC 341-16)*. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- Aritonang, K. N., & Hayu, G. A. (2020). Eight-story apartment building design using steel structures with EBF (eccentrically braced frame) stiffeners. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, 4(1).
- Ashrafi, A., & Imanpour, A. (2021). Seismic response of steel multi-tiered eccentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 181, 106600.
- Azad, S. K., & Topkaya, C. (2017). A review of research on steel eccentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 53–73.
- Bozkurt, M. B., & Topkaya, C. (2018). Replaceable links with gusseted brace joints for eccentrically braced frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 305–318.
- Bosco, M., Marino, E. M., & Rossi, P. P. (2016). Influence of modelling of steel link beams on the seismic response of EBFs. *Engineering Structures*, 127, 459–474.
- Bosco, M., Marino, E. M., & Rossi, P. P. (2017). A design procedure for dual eccentrically braced-moment resisting frames in the framework of Eurocode 8. *Engineering Structures*, 130, 198–215.
- Cari, K. C., & Bramantoro, D. T. A. (2023). Pengaruh bentuk bracing eksentris pada struktur gedung baja terhadap kinerja struktur dengan analisis gempa respon spektrum. *Composite: Journal of Civil Engineering*, 2(1), 25–32.
- Desimaliana, E., Arifin, A. S., & Kamaludin, S. (2025). Analisis time history terhadap kinerja struktur gedung baja bresing konsentrik (Inverted-V). *Journal of Sustainable Construction*, 5(1), 35–40. <https://doi.org/10.26593/josc.v5i1.9673>
- Desimaliana, E., Ramadhini, Z. K., Arifin, A. S., & Nurrensyah, D. (2025). Kinerja struktur gedung fashion gallery terhadap penggunaan kayu laminasi laban. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 21(1), 55–66. <https://doi.org/10.25077/jrs.21.1.55-66.2025>
- FEMA. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- Keivan, A., & Zhang, Y. (2019). Seismic performance evaluation of self-centering K-type and D-type eccentrically braced frame systems. *Engineering Structures*, 184, 301–317.
- Kusuma, K. A. T., Nindyawati, N., Sulaksitaningrum, R., & Muhammad, D. F. (2025). Structural performance optimization of multi-story steel frames with Split-K EBF bracing system configuration. *INERSIA*, 21(1), 81–90.
- Lettieri, A., de la Peña, A., Freddi, F., & Latour, M. (2023). Damage-free self-centring links for eccentrically braced frames: Development and numerical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 201, 107727.
- Lian, M., & Su, M. Z. (2017). Experimental study and simplified analysis of EBF fabricated with high-strength steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 139, 6–17.
- Mata, R., Nuñez, E., Caló, B., & Herrera, R. (2023). Seismic performance of eccentrically braced frames with short-links: IDA approach using Chilean earthquakes. *Journal of Building Engineering*, 76, 107186.
- Mohsenian, V., Filizadeh, R., Hajirasouliha, I., & Garcia, R. (2021). Seismic performance assessment of eccentrically braced steel frames with energy-absorbing links under sequential earthquakes. *Journal of Building Engineering*, 33, 101576.
- Özkılıç, Y. O., Bozkurt, M. B., & Topkaya, C. (2021). Mid-spliced end-plated replaceable links for eccentrically braced frames. *Engineering Structures*, 237, 112225.
- Ramonell, C., & Chacón, R. (2021). On the topological optimization of horizontal links in eccentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 185, 106887.
- Rezaeian, A. R., Shayanfar, M., & Jelokhani, P. (2022). The experimental study of eccentrically braced frames with double vertical links. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107587.
- SNI 1726:2019. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1727:2020. (2020). *Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1729:2020. (2020). *Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Siadari, F. S., Desimaliana, E., & Arifin, A. S. (2024). Evaluasi kinerja struktur bangunan café di Kabupaten Bandung dengan time history berdasarkan FEMA 356. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 10(3). <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v10i3.211>
- Tapia-Hernández, E., & García-Carrera, S. (2019). Inelastic response of ductile eccentrically braced frames. *Journal of Building Engineering*, 26, 100903.



- Tian, X., Su, M., Lian, M., et al. (2018). Seismic behavior of K-shaped eccentrically braced frames with high-strength steel: Shaking table testing and FEM analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 146, 222–235.
- Ün, E. M., Al-Janabi, M. A. Q., & Topkaya, C. (2022). Seismic performance evaluation of eccentrically braced frames with long links using FEMA P695 methodology. *Engineering Structures*, 258, 114104.
- Yang, T. Y., Neitsch, J., Al-Janabi, M. A. Q., & Tung, D. P. (2020). Seismic performance of eccentrically braced frames designed by the conventional and equivalent energy procedures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106322.