

Perbandingan Retrofit Seismik Struktur Baja Eksisting dengan *X-Bracing* Dan *Inverted V-Bracing*

* Muhammad Iqbal Habibi Kamal, Sri Wanto¹, Nurul Firkhati Hidayah¹

¹Teknik Sipil, Universitas PGRI Linggabuana, Sukabumi

^{*}iqbalhabibi@unlip.ac.id

Abstract

Indonesia is a country that is at the meeting point of three of the Earth's main plates, namely the Indo-Australian Plate, the Eurasian Plate and the Pacific Plate, which are currently actively moving. The plate that really influences the situation around the Java region is the pushing of the Indo-Australian plate towards the Eurasian plate. This situation causes the formation of many volcanoes in Sumatra, Java, Bali and Papua, and active movements between plates often cause earthquakes in these regions. Indonesia's geographic location has a high risk of earthquake impacts, but the rapid development and growth of infrastructure can affect the service life of a building structure. Earthquakes are unpredictable dynamic loads, especially for buildings designed according to old design codes and standards, which are vulnerable to earthquake loads. To achieve satisfactory global seismic behavior, it is necessary to evaluate the existing structure and add appropriate reinforcement. This paper analyzes the strengthening of steel structures using *X-Bracing* and *Inverted V-Bracing* BRB with the Pushover Analysis Method. The results of this research are presented in the form of a fragility curve which describes the probability of damage before and after strengthening the *X-Bracing* and *Inverted V-Bracing* BRB. By knowing the overall structure in the form of a capacity curve, it is possible to rationally evaluate retrofit strategies.

Keywords: *X-Bracing* BRB, *Inverted V-Bracing*, phusover analysis, fragility curve, capacity curve.

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang berada pada pertemuan tiga lempeng utama bumi yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik yang sedang aktif bergerak. Lempeng yang sangat mempengaruhi keadaan di sekitar wilayah Jawa adalah desakan lempeng Indo-Australia ke arah lempeng Eurasia. Keadaan ini menyebabkan terbentuknya banyak gunung berapi di Sumatera, Jawa, Bali, dan Papua, dan pergerakan aktif antar lempeng sering menyebabkan gempa bumi di wilayah tersebut. Letak geografis Indonesia memiliki risiko tinggi terhadap dampak gempa, namun perkembangan dan pertumbuhan infrastruktur yang pesat dapat mempengaruhi umur layanan suatu struktur bangunan. Gempa bumi merupakan beban dinamis yang tidak dapat diprediksi, terutama untuk bangunan yang didesain dengan kode dan standar desain lama, yang rentan terhadap beban gempa. Untuk mencapai perilaku seismik global yang memuaskan, perlu untuk mengevaluasi struktur yang ada dan menambahkan kekuatan yang sesuai. Makalah ini menganalisis kekuatan struktur baja menggunakan *X-Bressing* dan *Inverted V-Bressing* BRB dengan Metode Analisis Pushover. Hasil penelitian ini disajikan dalam bentuk kurva kerapuhan yang menggambarkan probabilitas kerusakan sebelum, sesudah kekuatan *X-Bracing* dan *Inverted V-Bressing* BRB. Dengan mengetahui struktur keseluruhan dalam bentuk kurva kapasitas, maka dimungkinkan untuk mengevaluasi strategi kekuatan secara rasional.

Kata kunci: *X-Bressing* BRB, *Inverted V-Bressing*, analisis phusover, kurva kerapuhan, kurva kapasitas.

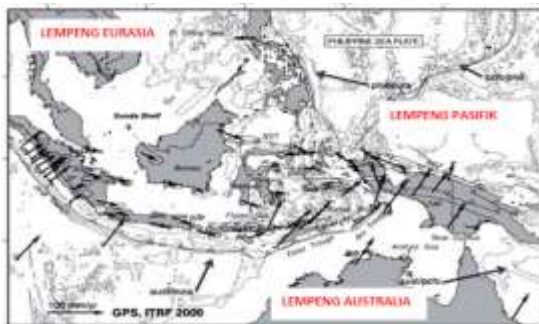
Pendahuluan

Pada era saat ini pembangunan menggunakan baja lebih praktis dibandingkan dengan beton dengan tujuan mengurangi durasi pelaksanaan prmbangunan proyek sehingga resiko keterlambatan yang terjadi lebih kecil. Selain itu pekerjaan dapat dilakukan jauh lebih aman dan

lebih mudah seperti persiapan, pemasangan, dan perawatan. Sehingga struktur baja menjadi salah satu pilihan atau solusi untuk dunia konstruksi yang sekarang ini sudah banyak digunakan diberbagai proyek pembangunan, baik itu untuk pembangunan gedung kantor, jembatan dan lain sebagainya. Salah satu pembangunan gedung yang menggunakan struktur baja yaitu Gedung Parkir Pintar di Gelora

Bung Karno dimana dengan target pembangunan saat itu delapan bulan harus selesai sebelum dimulai Asian Games pada tahun 2017. Dengan keterbatasan waktu tersebut maka penggunaan struktur rangka baja lebih efektif dibandingkan menggunakan struktur beton pada saat pembangunan proyek tersebut. Penggunaan struktur rangka baja pada pembangunan proyek Gedung Parkir Pintar di Geloran Bung Karno sangat cocok dan efektif menggunakan material baja mengingat nanti adanya beban dinamis yang sangat intensif saat banyak kendaraan nanti berparkir maka menggunakan material baja yang bersifat ductility lebih cocok digunakan dalam pembangunan gedung ini.

Mengingat wilayah Jakarta masuk dalam kategori area rawan gempa dimana sepanjang Jawa-Sumatra terdapat banyak gunung api yang masih aktif serta berada di atas tiga tumbukan lempeng benua, yakni, Indo-Australia dari sebelah selatan, Eurasia dari utara, dan Pasifik dari timur seperti pada Gambar 1.1. Ketiga lempeng tersebut selalu bergerak sepanjang tahun sehingga kadang-kadang menimbulkan interaksi berupa gesekan. Akibatnya gesekan tersebut menghasilkan energi yang cukup besar hingga mampu menggetarkan sekitarnya dan mencapai di permukaan tanah atau yang disebut juga gempa bumi.



Gambar 1. Peta lempeng kepulauan Indonesia

Dengan faktor letak geografis Indonesia yang tinggi resiko dampak gempa bumi maka perlu adanya sebuah analisa kerapuhan dan kerentanan bangunan tersebut terhadap beban gempa. Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi struktur bangunan rangka baja tersebut menggunakan nonlinier static analysis (pushover analysis) dengan tujuan menghitung kekuatan dan simpangan akibat pengaruh seismik dari struktur bangunan Gedung Parkir Pintar di Gelora Bung Karno yang terletak di wilayah area rawan gempa. Bangunan ini merupakan gedung parkir yang sangat fungsional pada saat ada kegiatan olahraga nasional maupun internasional. Oleh karena itu perlu dilakukan penilaian kelayakan dan seberapa ketahanan bangunan tersebut terhadap dampak gempa. Penelitian ini akan menggunakan

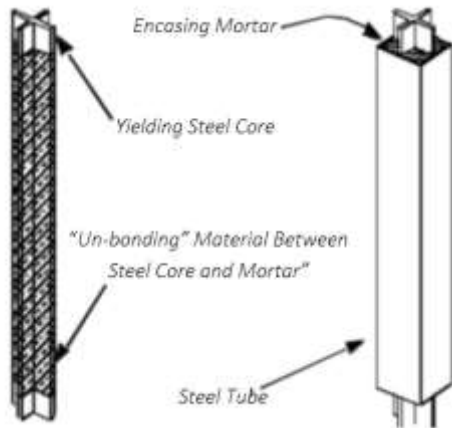
metode penentuan batas kerusakan yang digunakan untuk menganalisa angka kerapuhan struktur atau fragility Esteghamati and Farzampour, 2020. Probabilitas keruntuhan yang akan dinilai dan dievaluasi dengan menghubungkan nilai-nilai yang menjadi batasan struktur.

Kurva kerapuhan (fragility curve) sangat berguna untuk penilaian kinerja seismik sebuah struktur bangunan. Kurva kerapuhan juga menampilkan kerusakan yang terjadi pada sebuah struktur bangunan, sehingga dapat memprediksi seberapa kuat bangunan ketika menerima beban gempa. Pada bangunan eksisting belum terdapat sebuah perkuatan maupun rekayasa untuk menanggulangi jika terjadi gempa besar, untuk menaikkan kapasitas pada sebuah bangunan lama terhadap gempa maka diperlukan seismik retrofit. Hal-hal yang perlu diperhatikan ketika menentukan jenis seismik retrofit adalah mudah dilaksanakan serta ekonomis.

Salah satu metode untuk meningkatkan kekuatan kekakuan dan daktilitas bangunan perkuatan menggunakan material BRB dengan bentuk X-bressing dan Inverted V-Bressing. Pemasangan bressing akan diletakan pada antar kolom pusat massa / tengah bangunan dan hanya diterapkan pada tepi bangunan arah sumbu-Y. Penempatan perkuatan pada tepi bangunan dimaksud untuk tidak mengurangi fungsi ruang dan mobilitas pengguna. Meninjau dari sistem kekakuan portal yang mengacu sumbu kuat- sumbu lemah, dimana arah sumbu-X adalah masuk kategori sumbu kuat dan sumbu-Y adalah sumbu lemah. Dengan ditempatkan pada arah sumbu-Y merupakan lokasi yang tepat dimana dapat meningkatkan kinerja struktur. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja seismik tipikal struktur rangka baja bertingkat rendah-menengah dengan menentukan kerapuhan seismiknya sebelum dan sesudah dilakukan perkuatan X-bracing dan Inverted V-Bracing. Konsep rangka bressing tahan tekuk merupakan pengembangan dari sistem rangka bressing konsentrik. Konsep ini dimaksudkan untuk mengatasi permasalahan tekuk pada bressing yang akibat gaya tekan. Untuk mengantisipasi permasalahan tekuk dengan baik, maka nilai kelangsingan yang pada bressing harus diminimalkan dengan memperbesar luas penampang bressing, seperti menambahkan selongsong pada inti baja (berupa mortar atau beton) Ilham (2021).

Sebuah BRB terdiri dari inti baja yang memberikan ketahanan aksial dibatasi oleh casing besi beton penuh yang memberikan ketahanan lentur dan tekuk. BRB memiliki daktilitas yang cukup besar karena ikatan antara inti baja dan beton sekitarnya, Gambar 1.2 menunjukkan detail khas BRB. Sistem ini memberikan kekuatan dan kekakuan untuk mencegah tekuk global dan lokal serta sendi plastis

yang terkait dengan tekuk, hasil degradasi minimal kekuatan dan kekakuan dari BRB serta tarik dan tekan kapasitas yang sama.

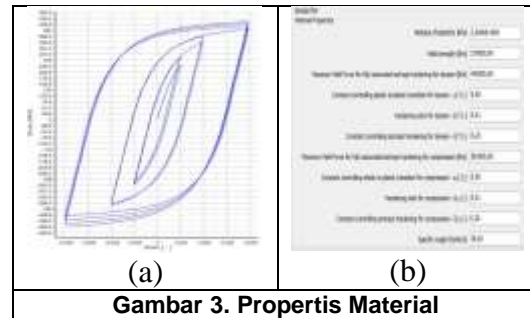


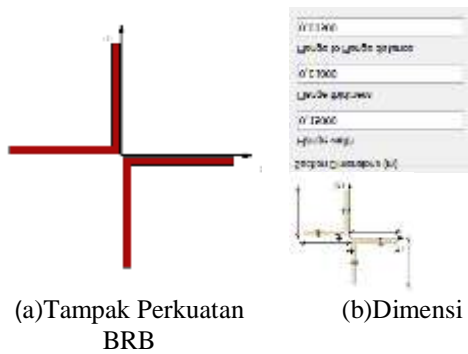
Gambar 2. Konsep buckling restrained braces

Dua metode penelitian langkah pertama dalam penelitian ini adalah memeriksa bangunan yang bersangkutan untuk menggambarkan konfigurasi bangunan yang diperlukan untuk memodelkan dan menentukan tingkat pengetahuan struktur. Kemudian strategi retrofit dengan penerapan X-bracing dan Inverted V-Bracing pada hipotesis diharapkan dapat memberikan peningkatan kapasitas gempa bangunan. Selanjutnya dilakukan pushover analysis untuk mendapatkan hubungan beban-deformasi struktur sebelum dan sesudah perkuatan. Kurva kapasitas yang dihasilkan dari prosedur tersebut digunakan sebagai input untuk menghitung kurva kerapuhan dari struktur sebelum dan sesudah perkuatan.

Metode

Dalam penelitian ini retrofit menggunakan menggunakan material Bressing-BRB yang digunakan dengan konfigurasi X-bracing dan Inverted V-Bracing. Tujuan dari penggunaan rangka bracing adalah kemampuan struktur untuk mempertahankan stabilitas akibat beban lateral dan stabilitas struktur secara keseluruhan. Sistem rangka bracing konsentrik ini merupakan sistem struktur yang elemen bracing diagonalnya bertemu satu titik. Seperti yang terlihat pada Gambar 3. Propertis Material





Gambar 5. Tampak Perkuatan dan Dimensi

Tatalaksana Penelitian

1. Pengumpulan data

Penelitian ini membutuhkan data sekunder untuk penyusunan dan analisis data yaitu :

- As built drawing gedung Parkir Pintar Gelora Bung Karno yang diperoleh dari instansi yang terkait.
- Literatur yang mendukung penelitian sebagai landasan menganalisis data (berupa jurnal, buku, peraturan, skripsi, tesis, dan disertasi) serta hasil penelitian sebelumnya.

2. Alat Penelitian

Analisis dilakukan dengan pengolahan data yang dihasilkan dari pengolahan permodelan dari *software Seismostruct*. Program *Seismostruct* merupakan program untuk menganalisis nonlinier statik dan dinamik rangka struktur melalui finite element yang mampu memprediksi perilaku displacement besar pada struktur dibawah pembebanan statik maupun dinamik dengan mempertimbangkan *geometric nonlinierities* dan material *inelasticity*. Pada penelitian ini perkuatan menggunakan bracing BRB dengan bentuk type konfigurasi yang X-Bracing dan Inverted V-Bracing. Buckling Restrained Brace (BRB) adalah pengaku anti tekuk yang berfungsi sebagai penahan gaya lateral dari struktur portal bangunan sehingga dapat meminimalisir defleksi yang terjadi. Salah satu kelebihan dari BRB dibandingkan dengan pengaku lainnya adalah kuat menahan gaya tekan maupun tarik. Kegagalan BRB adalah leleh pada tekan maupun tarik artinya tidak terjadi tekuk pada BRB.

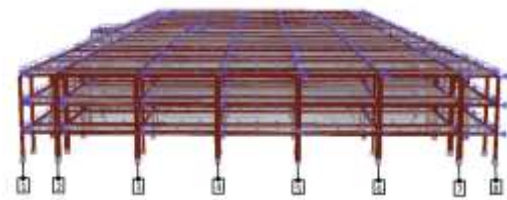
3. Denah Rencana Bracing

Struktur pada pemodelan ini merupakan bangunan yang dengan panjang 124 m dan lebar 53 m, 3 lantai yaitu Gedung Parkir Pintar Gelora Bung Karno Jakarta Pusat. Struktur ini dimodelkan dengan menggunakan analisis Phusover pada program *Seismostruct*. Pemodelan struktur dimodelkan beracuan pada

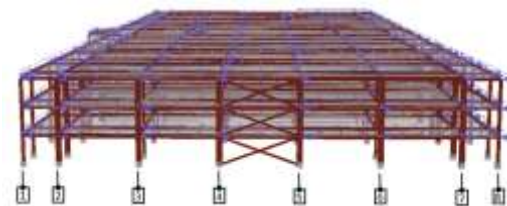
detail engineering design yang didapat pada program Auto Cad, seperti contoh pada Gambar 6 Denah Parkir Pintar GBK. Pemodelan bangunan existing dapat dilihat pada Gambar 7 Pemodelan Bangunan Eksisting dan rencana penempatan perkuatan yaitu pada As 4-5 A dan 4-5 N setiap lantai seperti pada Gambar 8 Rencana Pemodelan Bangunan Retrofit X-Bracing.



Gambar 6. Denah Parkir Pintar GBK



Gambar 7. Pemodelan Bangunan Eksisting



Gambar 8. Rencana Pemodelan Bangunan Retrofit X-Bracing



Gambar 9. Rencana Pemodelan Bangunan Retrofit Inverted V-Bracing

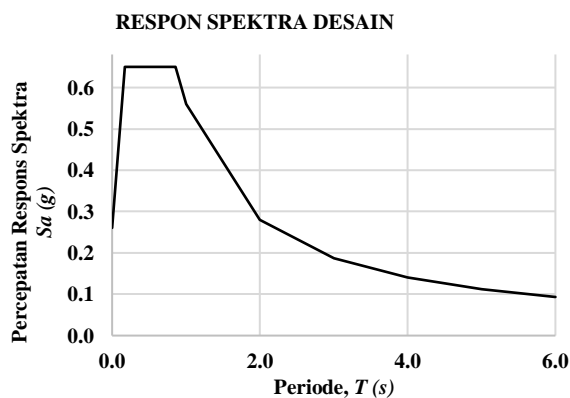
4. Pembebanan Struktur

Beban-beban yang direncanakan bekerja pada struktur gedung tergantung dari fungsi ruangan, lokasi, bentuk, kekakuan, massa, dan ketinggian gedung itu sendiri :

- Beban mati adalah berat sendiri struktur berasal dari material yang digunakan dan beban mati tambahan yang bekerja pada struktur. Pada software *Seismostruct*, berat sendiri struktur dihitung secara otomatis

berdasarkan input data material dan dimensi penampang yang digunakan.

- Beban mati tambahan adalah beban tambahan lain yang membebani struktur secara tetap, antara lain finishing lantai dan dinding. Dalam perencanaan ini, beban mati tambahan yang diperhitungkan antara lain keramik, spesi, plafond dan penggantung, mekanikal elektrik, serta dinding ½ bata.
- Beban hidup adalah beban akibat penghunian atau penggunaan struktur gedung. Beban pada lantai yang berasal dari barang yang dapat berpindah, mesin, serta peralatan. Beban ini tidak dapat terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa layan. Untuk bangunan perkantoran, beban hidup yang digunakan sebesar 250 kg/m².
- Analisis struktur terhadap beban gempa menggunakan metode respons spektrum sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI), 2019. Seperti yang terlihat pada Gambar 10 Spektrum Respons Desain.



Gambar 10. Spektrum Respons Desain

5. Analisis Pushover

Secara umum metode ini sering disebut dengan analisis pushover, dimana perilaku struktur dianalisis dengan menerapkan pola pembebanan statis inkremental yang ditentukan oleh arah lateral simpul kolom balok pada model struktur. Beban massa pada setiap lantai ditempatkan dalam bentuk beban seragam pada model ini. Hasil dari metode pushover ini adalah kurva kapasitas yang menggambarkan gaya geser dasar sebagai fungsi perpindahan lateral struktur.

6. Kurva Kerapuhan

Kurva kerapuhan digunakan untuk menentukan kemungkinan kerusakan struktural berdasarkan parameter permintaan (intensitas gempa) selama masa pakainya. Parameter tersebut adalah intensitas guncangan tanah berupa Peak Ground Acceleration (PGA), Peak Ground Velocity (PGV) atau perpindahan spektral selama periode

tertentu. Fungsi kerapuhan dapat dinyatakan dengan persamaan (1)

$$Pf[ds \geq dsi|IM] = \Phi\left[\frac{1}{\beta ds} \ln\left(\frac{IM}{IMmi}\right)\right] \quad (1)$$

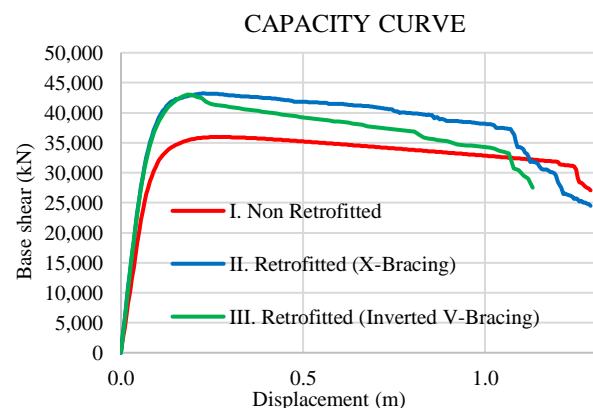
Dimana :

Pf adalah probabilitas bersyarat untuk berada atau melampaui tingkat kerusakan tertentu, DS adalah ukuran gempa bumi intensitas, IM adalah fungsi kumulatif standar, IMmi adalah nilai median intensitas gempa yang menyebabkan status kerusakan ke-i, dan total adalah sebaran yang mewakili simpangan baku total. Intensitas gempa IM parameter dapat mencakup percepatan/kecepatan/perpindahan puncak tanah, percepatan spektral, kecepatan spektral, atau perpindahan spektral. Dalam tulisan ini, perpindahan spektral, Sd, dipilih sebagai parameter intensitas gempa sebagai cara mudah untuk menghubungkan tingkat kerusakan. Ini menunjukkan kapasitas pasca-elastis yang lebih tinggi.

Hasil dan Pembahasan

1. Kurva Kapasitas

Hasil analisis pushover dari pemodelan dengan menggunakan program seismostruct menghasilkan kurva kapasitas seperti pada gambar Gambar 11. Kurva kapasitas



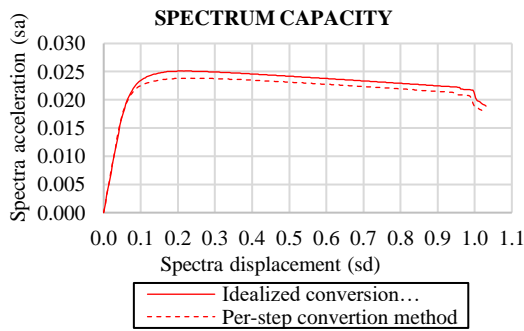
Gambar 11. Kurva Kapasitas

Melihat dari kurva diatas menunjukkan bahwa dengan adanya perkuatan bressing menunjukkan adanya peningkatan daya yang mampu diterima yang awal sebelum ditambahkan perkuatan bressing mampu menahan 35,2 KN sedangkan pada perkuatan X-Bracing mampu menahan 41,8 KN dan pada perkuatan Inverted V-Bracing mampu menahan 39.2 KN. Dari hasil analisa ini menunjukkan bahwa perkuatan X-bracing lebih baik menahan gaya geser daripada perkuatan

Inverted V-Bracing. Seperti yang terlihat pada kurva menunjukkan bahwa pada displacement 20 cm memperlihatkan penurunan kapasitas, sedangkan pada perkuatan X-Bracing displacement 50 cm masih tetap bertahan.

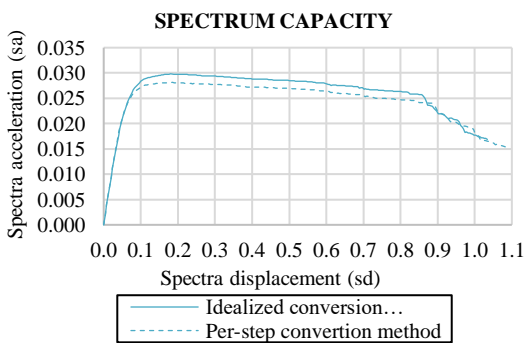
2. Kurva Respon Spektrum

Dari hasil diatas bisa diperoleh perhitungan penentuan kurva respon spektrum yang didapat dari hasil kurva kapasitas. Kurva respon spektrum bisa dilihat pada Gambar. 12 Kurva Respon Spektrum (Eksisting).



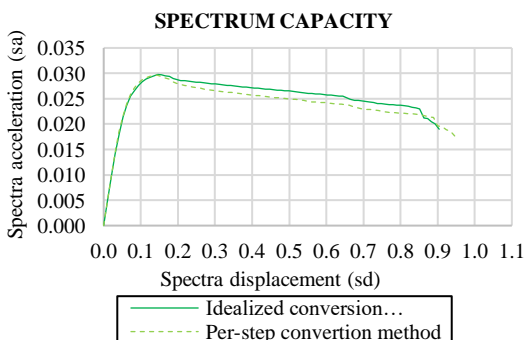
Gambar 12. Kurva Respon Spektrum (Eksisting)

Dari kurva diatas menunjukkan bahwa dengan perpindahan spektral 10 - 40 cm mengalami penurunan 1.5 cm pada bangunan eksisting.



Gambar 13. Kurva Respon Spektrum (X-Bracing)

Dari kurva diatas menunjukkan bahwa dengan perpindahan spektral 10 - 40 cm mengalami penurunan 8 mm pada bangunan eksisting.

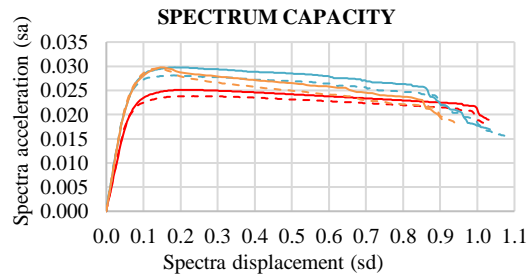


Gambar 14. Kurva Respon Spektrum (Inverted V-Bracing)

Dari kurva diatas menunjukkan bahwa dengan perpindahan spektral 10 - 40 cm mengalami penurunan 4,5 mm pada bangunan eksisting.

3. Perbandingan Kurva Respon Kapasitas Spektrum

Dari hasil diatas dapat diperoleh perbandingan hasil kurva respon spektrum. Seperti yang terlihat pada Gambar 15. Perbandingan Kurva Respon Spektrum.



Gambar 15. Perbandingan Kurva Respon Spektrum

4. Batas Kerusakan

Untuk menilai tingkat kinerja suatu struktur dapat ditentukan dengan menggunakan keadaan batas kerusakan. Batas kerusakan ditentukan berdasarkan bangunan akibat gempa. Secara kualitatif, klasifikasi kerusakan secara umum adalah sebagai berikut:

- No Damage
- Slightly Damaged
- Medium Broken
- Damage Weight/ Area

Dari klasifikasi diatas diplot/ditampilkan dalam bentuk kurva kerapuhan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah HAZUZ MH-MR5. HAZUZ MH-MR5 untuk klasifikasi seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Damage State (sd)

Damage Level	Non Retrofit	X-Bracing	Inverted V-Bracing
Slight	0.0399	0.0521	0.0521
Moderate	0.2397	0.1363	0.1363
Extensive	0.3155	0.3166	0.3166
Complete	0.3994	0.4008	1.0340

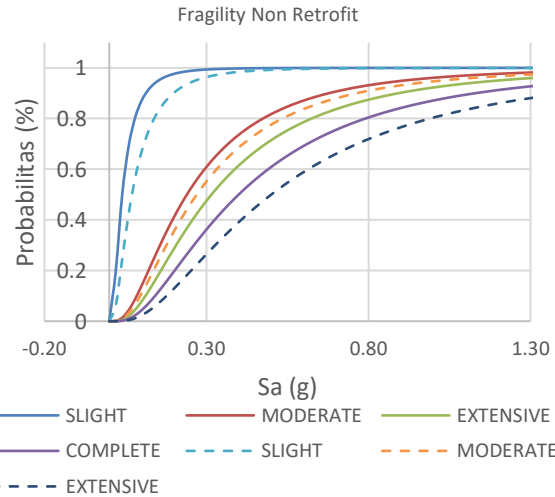
Sementara itu, mengusulkan geser dasar maksimum menurut titik perpindahan untuk dijadikan keadaan kerusakan. Batas keadaan 1 (LS1) ditentukan pada saat perpindahan atap

telah mencapai geser dasar maksimum. Batasi keadaan 2 (LS2) ditentukan sebagai perpindahan pada geser dasar maksimum, sedangkan keadaan batas 3 (LS3) ditentukan oleh perpindahan spektral ketika 80% dari geser dasar maksimum pasca puncak tercapai. Tabel 2 menunjukkan rekap dari status kerusakan (batas) seperti yang disarankan oleh Silva dkk.

Tabel 2. Damage State (sd)

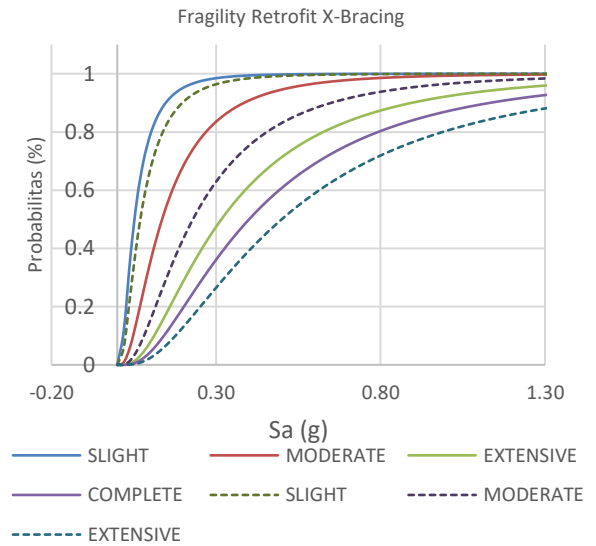
Damage Level	Non Retrofit	X-Bracing	Inverted V-Bracing
LS1	0.0700	0.0700	0.1820
LS2	0.2700	0.2300	0.4810
LS3	0.5000	0.5000	1.1310

Dalam mengembangkan kerapuhan struktur eksisting, variabilitas sifat kejadian gempa (aleatorik ketidakpastian) dan dalam model (ketidakpastian epistemik) harus diperhitungkan dengan menghitung standar deviasi ketidakpastian (β): deviasi standar ketidakpastian spektrum permintaan, deviasi standar kapasitas struktur spektrum (β_c), simpangan baku nilai keadaan kerusakan ($\beta M(ds)$). Simpangan baku total bisa ditentukan oleh persamaan 2.



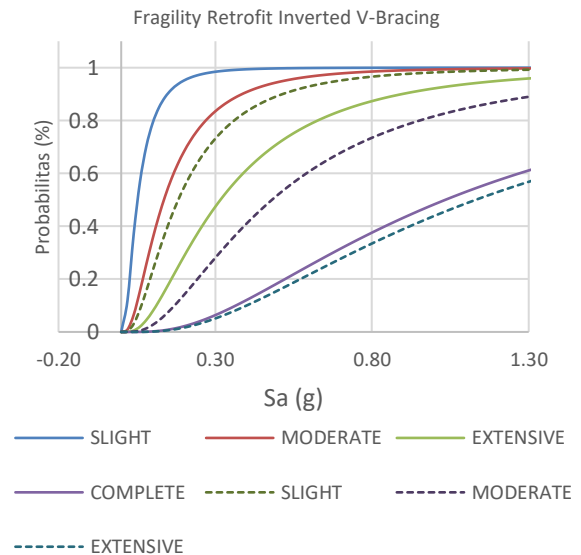
Gambar 16. Kurva Kerapuhan Non Retrofit

Hasil dari kurva kapasitas diperoleh kurva kerapuhan yang merupakan indikator probabilitas keruntuhan pada sebuah bangunan. Seperti yang terlihat pada Gambar 16. Kurva Kerapuhan Non Retrofit menunjukkan untuk perpindahan sebesar 50cm pada tahap *Slight* probabilitas keruntuhan 100%, pada tahap *moderat* probabilitas keruntuhan 80%, pada tahap *extensive* probabilitas keruntuhan 71%, pada tahap *complete* probabilitas keruntuhan 60%.



Gambar 17. Kurva Kerapuhan Retrofit X-Bracing

Gambar 17. Kurva Kerapuhan *Retrofit X-Bracing* menunjukkan untuk perpindahan sebesar 50cm pada tahap *Slight* probabilitas keruntuhan 100%, pada tahap *moderat* probabilitas keruntuhan 94%, pada tahap *extensive* probabilitas keruntuhan 71%, pada tahap *complete* probabilitas keruntuhan 60%.



Gambar 18. Kurva Kerapuhan Retrofit Inverted V-Bracing

Gambar 18. Kurva Kerapuhan *Retrofit X-Bracing* menunjukkan untuk perpindahan sebesar 50cm pada tahap *Slight* probabilitas keruntuhan 100%, pada tahap *moderat* probabilitas keruntuhan 94%, pada tahap *extensive* probabilitas keruntuhan 71%, pada tahap *complete* probabilitas keruntuhan 15%.

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah memberikan hasil dari pembahasan bahwa kekuatan *X-Bracing* lebih baik dan efektif dalam menambah kapasitas Base Shear dibandingkan menggunakan kekuatan *Inverted V-Bracing*. Seperti yang terlihat pada Gambar 11. Kurva Kapasitas memperlihatkan setelah displacement 20 cm mengalami penurunan signifikan pada kekuatan *Inverted V-Bracing* dibandingkan kekuatan *X-Bracing*. Untuk probabilitas keruntuhan setelah tercapai kapasitas gesernya dengan kekuatan bracing lebih tinggi dibandingkan tanpa kekuatan dikarenakan secara keutuhan struktur lebih kaku (*stiffness*). Pada kekuatan *X-Bracing* lebih tinggi probabilitas keruntuhannya dibandingkan kekuatan *Inverted V-Bracing* pada tahap *complete*. Harapan untuk penelitian selanjutnya agar meninjau hasil analisa dengan konfigurasi kekuatan lainnya dan bagaimana perilaku struktur secara keseluruhan.

Ucapan Terima Kasih

Yang utama dari segalanya ...

Sembah sujud serta syukur kepada Allah SWT atas karunia serta kemudahan dalam menyelesaikan penelitian ini.

Kupersembahkan karya sederhana ini kepada orang terkasih dan tersayang.

Keluarga

Untuk ibu, istri dan anak saya yang tanpa henti memberi semangat dan mendoakan untuk kesuksesan saya, terima kasih atas segalanya. Semoga masih diberi waktu untuk bisa membalas semua itu dengan membahagiakan dan membanggakan kalian.

Daftar Pustaka

Almeida, A. *et al.* (2017) "Seismic retrofit of RC building structures with Buckling Restrained Braces," *Engineering Structures*, 130. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.036>.

Badan Standardisasi Nasional (2019) "perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, pemeliharaan dan penilaian kelayakan dan bangunan gedung dan nongedung sebagai revisi struktur bangunan gedung dan nongedung; Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun," *Sni 1726: 2019*, (8), hal. Herman Kurnianto, D., Teoretis dan Terapan Bidan.

Balkamou, N. dan Papagiannopoulos, G. (2024) "Seismic Upgrade of an Existing Reinforced Concrete Building Using Steel Plate Shear Walls (SPSW)," *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(1). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app14010443>.

Bruschi, E. dan Quaglini, V. (2024) "Assessment of Non-Linear Analyses of RC Buildings Retrofitted with Hysteretic Dampers According to the Italian Building Code," *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(7). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app14072684>.

Bruschi, E., Quaglini, V. dan Zoccolini, L. (2023) "Seismic Upgrade of Steel Frame Buildings by Using Damped Braces," *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(4). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app13042063>.

Cristina, C. *et al.* (2017) "Seismic retrofitting of an existing steel structure," in *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Tersedia pada: <https://doi.org/10.5593/sgem2017/62/S26.051>.

Devi, R.H., Sangadji, S. dan Saifullah, H.A. (2020) "Fragility curve of low-to-mid-rise concrete frame retrofitted with FRP," in *E3S Web of Conferences*. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015603006>.

Farzampour, A. *et al.* (2023) "Development of Innovative Lateral Resistance Systems Featuring Earthquake-Protective Dampers," *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app13063852>.

Gandelli, E. *et al.* (2023) "Seismic Retrofit of Warehouses with Masonry Infills and Glazed Curtain Walls through Hysteretic Braces: Refinement of the Italian Building Code Provisions," *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(15). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app13158634>.

Hapsari, I.R. *et al.* (2023) "Damage States Investigation of Infilled Frame Structure Based on Meso Modeling Approach," *Buildings*, 13(2). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/buildings13020298>.

Hu, S. dan Wang, W. (2021) "Comparative seismic fragility assessment of mid-rise steel buildings with non-buckling (BRB and SMA) braced frames and self-centering energy-absorbing dual rocking core system," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142. Tersedia pada:

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106546>.

Jiang, S. *et al.* (2024) “Assessment of Soft-First-Floor Structures Reinforced by Rocking Frame Based on Seismic Resilience,” *Buildings*, 14(1). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/buildings14010197>.

Kim, M.S. dan Lee, Y.H. (2023) “Seismic Behavior of Concrete Columns Retrofitted with a Brace-Type Replaceable Steel Link,” *Materials*, 16(3). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/ma16031182>.

Lee, B.G. *et al.* (2023) “Seismic Capacity of R/C Buildings Retrofitted with a V-Bracing System Equipped with a Novel Laterally Layered Friction Damper,” *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(24). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app132413205>.

Moreira, R.F., Castro, J.M. dan Varum, H. (2022) “On the Applicability of Conventional Seismic Design Methodologies to Hybrid RC-Steel Systems,” *Ce/Papers*, 5(2), hal. 162–171. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1002/cepa.1711>.

Rahma, M. *et al.* (2023) “Evaluating Retrofitting Strategies of Low-to-Mid-Rise Reinforced Concrete Structure Based on Its Seismic Fragility,” *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 13(2). Tersedia pada: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.13.2.17480>.

Ro, K.M., Kim, M.S. dan Lee, Y.H. (2024) “An Experimental Study on the Seismic Performance of a Replaceable Steel Link System Acting as a Structural Fuse,” *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(6). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app14062358>.

Sahoo, D.R., Patra, P. dan Jain, A.K. (2023) “Advances and Challenges in Design of Connections in Steel-Braced Frame Systems with In-Plane Buckling Braces,” *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/app13063959>.

Shmerling, A. dan Gerds, M. (2022) “A Design Methodology for the Seismic Retrofitting of Existing Frame Structures Post-Earthquake Incident Using Nonlinear Control Systems,” *Buildings*, 12(11). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/buildings12111886>.

Sumedi, P.P., Sangadji, S. dan Saifullah, H.A. (2023) “The fragility curve of low-to-mid-rise steel frame buildings retrofitted with inverted V-bracing,” in *AIP Conference Proceedings*. Tersedia

pada: <https://doi.org/10.1063/5.0128995>.

Titirla, M.D. (2023) “A State-of-the-Art Review of Passive Energy Dissipation Systems in Steel Braces,” *Buildings*, 13(4). Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/buildings13040851>.

Wanto, S., Sangadji, S. dan Saifullah, H.A. (2023) “Seismic retrofitting of existing steel structures with X-bracing,” *AIP Conference Proceedings*, 2482(February). Tersedia pada: <https://doi.org/10.1063/5.0112776>.

Zaker Esteghamati, M. dan Farzampour, A. (2020) “Probabilistic seismic performance and loss evaluation of a multi-story steel building equipped with butterfly-shaped fuses,” *Journal of Constructional Steel Research*, 172. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106187>.

