

# **RETROFIT TERHADAP GEMPA MENGGUNAKAN *BUCKLING RESTRAINED BRACES* DAN *CARBON FIBER- REINFORCED POLYMER JACKETING* PADA BANGUNAN RUKO EMPAT LANTAI TIDAK BERATURAN YANG DIDESAIN TERHADAP BEBAN GRAVITASI**

Atteroni Pratomo<sup>1</sup>, Kevin R. Anggrek<sup>2</sup>, Jimmy Chandra<sup>3</sup>, dan Joko Purnomo<sup>4</sup>

**ABSTRAK :** Penelitian kali ini akan meninjau sebuah bangunan yang hanya didesain terhadap beban gravitasi saja (*Gravity Load Designed*/GLD) berupa ruko empat lantai. Penelitian ini akan berfokus pada pemberian perkuatan menggunakan *Buckling Restrained Braces* (BRB) dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) pada bangunan GLD yang ditinjau. Tujuan dari penelitian ini adalah meninjau kinerja struktural dari bangunan GLD sebelum dan sesudah diberikan perkuatan. Dalam penelitian ini, bangunan GLD ditinjau menggunakan pemodelan secara nonlinear pada elemen-elemen struktural termasuk pemodelan *non-ductile* pada *joint* balok-kolom dan dinding untuk memperoleh hasil yang realistis. Untuk meninjau performa struktural dari bangunan GLD sebelum dan sesudah diberikan perkuatan, dilakukan analisis dinamis nonlinear riwayat waktu tiga dimensi menggunakan program SAP2000. Hasil analisis dalam penelitian ini ditampilkan melalui simpangan lantai maksimum, *drift* lantai maksimum, dan juga lokasi-lokasi terjadinya kerusakan pada bangunan GLD sebelum dan sesudah diberikan perkuatan. Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa BRB dan CFRP sebagai metode perkuatan pada bangunan GLD dapat bekerja dengan efektif secara bersamaan dalam mengurangi kerusakan dan *drift* yang terjadi.

**KATA KUNCI:** bangunan GLD, *buckling restrained braces*, *carbon fiber reinforced polymer*, pemodelan nonlinear.

## **1. PENDAHULUAN**

Gempa bumi adalah salah satu bentuk bencana alam yang sering terjadi di Indonesia. Kerusakan yang disebabkan oleh gempa bumi meliputi kerusakan dari segi material maupun korban jiwa. Pada gempa yang melanda DI Yogyakarta pada 27 Mei 2006 mengakibatkan korban jiwa sebesar 4710 jiwa (BNPB, 2018). Korban jiwa yang terjadi saat gempa berlangsung disebabkan oleh kerusakan dan keruntuhan dari bangunan serta sarana prasarana di sekitar korban jiwa. Bangunan-bangunan yang runtuh pada saat berlangsungnya gempa secara umum tidak didesain untuk menahan beban gempa melainkan hanya beban gravitasi saja dan dikategorikan sebagai bangunan GLD (*Gravity Load Designed*).

Untuk mencegah dan mengurangi kerusakan akibat gempa, maka digunakan berbagai jenis metode perkuatan atau *retrofit*. Berbagai strategi perkuatan telah dikembangkan dan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, selain itu setiap bangunan GLD memiliki faktor-faktor yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan strategi perkuatan yang tepat dan efektif. Dalam penelitian ini akan ditinjau metode perkuatan menggunakan *Buckling Restrained Brace* (BRB) dan

---

<sup>1</sup> Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, [atteronipratomo@gmail.com](mailto:atteronipratomo@gmail.com)

<sup>2</sup> Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, [kevin.anggrek@gmail.com](mailto:kevin.anggrek@gmail.com)

<sup>3</sup> Dosen Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, [chandra.jimmy@petra.ac.id](mailto:chandra.jimmy@petra.ac.id)

<sup>4</sup> Dosen Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, [jpurnomo@petra.ac.id](mailto:jpurnomo@petra.ac.id)

teknik *jacketing* menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). *Jacketing* menggunakan CFRP dilakukan untuk memberikan tambahan *external confinement* pada elemen struktur beton untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitasnya (Saadatmanesh, Ehsani, & Li, 1994). Sedangkan BRB merupakan *bracing* dengan inti baja yang dibungkus oleh bagian penahan (*restraining part*) untuk mencegah tekuk/*buckling*. BRB dapat digunakan sebagai *hysteretic damper* karena memiliki kuat leleh yang setara terhadap gaya tarik maupun tekan (Iwata, 2004). Dalam penelitian ini, pemodelan struktur dilakukan secara nonlinear untuk memperoleh perilaku struktur yang lebih realistis. Pemodelan secara nonlinear dilakukan seperti dengan mempertimbangkan *material nonlinearity*, pemodelan dinding bata sebagai *diagonal strut* konsentris yang mengacu kepada FEMA 356 (2000), termasuk pemodelan *non-ductile* pada area *joint* kolom-balok oleh Eom et al (2015).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja struktural dari bangunan GLD di wilayah gempa Surabaya sebelum dan sesudah diperkuat dengan BRB dan CFRP *jacketing* untuk mengetahui tingkat keefektifan kedua metode perkuatan tersebut dalam meningkatkan performa struktural.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Perilaku Bangunan GLD saat terjadi Gempa.

Secara umum, bangunan GLD merupakan bangunan yang hanya didesain untuk menahan beban gravitasi sehingga akan mengalami keruntuhan saat terjadi gempa. Dari survei-survei yang dilakukan Tim Survei Lapangan Universitas Kristen Petra pada gempa di Nias (2005), Yogyakarta (2006), dan Padang (2009), beberapa penyebab kerusakan bangunan GLD saat terjadi gempa adalah ketidakberaturan tingkat lunak atau *soft story* dan adanya hal-hal yang tidak memenuhi standar desain gempa misalnya jumlah sengkang yang tidak memadai, pemasangan kait sengkang yang tidak sesuai, tulangan kolom yang tidak diteruskan, dan lain-lain. Hal ini dapat disebabkan oleh desain yang tidak memenuhi standar desain gempa maupun adanya kelalaian dan pelanggaran selama proses pelaksanaan atau konstruksi.

### 2.2. FRP *Jacketing* sebagai Metode Perkuatan

Teknik *jacketing* merupakan pemberian *external confinement* pada elemen struktur beton bertulang dengan tujuan untuk memberikan pengekangan tambahan dari luar. Dalam hal ini, fungsinya seperti sengkang yang juga memberikan *confinement* pada elemen struktur. Jenis-jenis perkuatan menggunakan teknik *jacketing* adalah dengan menggunakan beberapa jenis material seperti beton (*Concrete Jacketing*), baja (*Steel Jacketing*), maupun dengan material komposit seperti FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Setiap jenis *jacketing* memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Dalam Saadatmanesh et al. (1994) dibahas secara detail kelebihan dari penggunaan FRP sebagai material *jacketing* antara lain: meningkatkan daktilitas sebagai hasil dari *external confinement*, mudah untuk diaplikasikan ke berbagai bentuk penampang karena fleksibilitasnya tinggi, biaya perawatan rendah karena material FRP tahan karat, pelaksanaan konstruksinya mudah karena beratnya yang ringan sehingga dapat menekan biaya pelaksanaan, dan estetika struktur yang tetap terjaga karena FRP terbuat dari serat fiber yang sangat tipis (kurang dari 100 mils atau 2.54 mm). Pemilihan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dibandingkan FRP lainnya adalah karena *external confinement* dan perilaku *stress-strain*-nya lebih baik dibandingkan material FRP lainnya seperti GFRP maupun baja sebagai material *jacketing*.

### 2.3. BRB sebagai Metode Perkuatan

BRB merupakan sejenis *bracing* yang dapat berfungsi sebagai *hysteretic damper* karena memiliki kestabilan dalam menghasilkan kuat leleh terhadap tarik maupun tekan. Hal ini karena BRB terdiri dari inti baja yang dibungkus oleh bagian penahan (*restraining part*) yang dapat mencegah tekuk (Iwata, 2004) sehingga BRB akan memiliki perilaku *hysteretic* yang lebih daktil dibandingkan

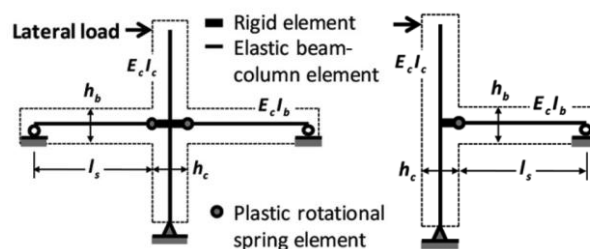
*bracing* konvensional. Dalam penelitian Connor et al. (1997) disebutkan bahwa BRB menerapkan prinsip *damage-controlled structure* dimana suatu sistem struktur terbagi menjadi komponen primer dan sekunder, dalam hal ini BRB berperan sebagai komponen sekunder yang akan melakukan disipasi energi dari beban lateral seperti gempa sehingga BRB akan menjadi plastis terlebih dahulu sedangkan komponen struktur utama dijaga tetap elastis. Kelebihan dari BRB ini adalah membuat bangunan yang sudah berdiri tetapi tidak didesain terhadap gempa tidak runtuh setelah terjadinya gempa dimana setelah terjadi gempa, BRB yang mengalami kerusakan dapat kemudian diganti sedangkan bangunan struktur utama akan tetap dapat digunakan karena kerusakan yang terjadi dipusatkan pada komponen sekunder (BRB) sedangkan komponen primer dijaga tetap elastis (Iwata, 2004).

## 2.4. Pemodelan Dinding Bata

Dinding bata merupakan komponen struktur yang diabaikan dalam perencanaan struktural. Meski demikian, dinding bata memiliki pengaruh yang signifikan sehingga tidak seharusnya diabaikan. Dinding bata memiliki pengaruh terhadap kekakuan dan kekuatan struktur dimana penempatan dinding yang baik dan benar dapat memperbaiki kesimetrisan struktur dan mengembalikan pusat kekakuan supaya berhimpit dengan pusat massa. Hal ini dapat menghilangkan efek puntir yang terjadi pada bangunan, sedangkan penempatan yang tidak tepat dapat memperburuk pengaruh yang telah disebutkan diatas. Pemodelan dinding bata dalam penelitian ini mengacu kepada pemodelan dinding *diagonal strut* yang dimodelkan dalam FEMA 356 (2000).

## 2.5. Pemodelan Non-ductile pada Beam-Column Joint

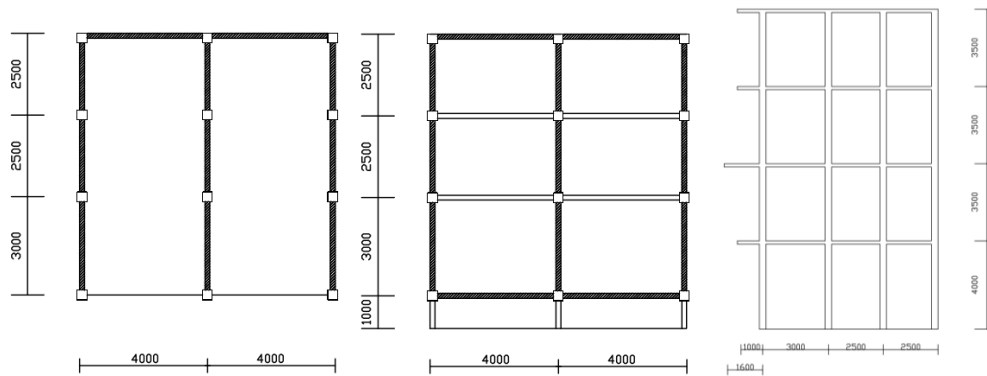
Dalam proses pengerjaan konstruksi bangunan, daerah *beam-column joint* sering kali kurang diperhatikan atau diabaikan. Hal ini dapat ditandai salah satunya dengan kurangnya jumlah sengkang yang memadai pada daerah *joint*. Hal ini menyebabkan kerusakan yang cukup signifikan akibat gempa pada daerah tersebut. Dalam penelitian ini, pemodelan *beam-column joint* akan mengacu kepada pemodelan yang dikembangkan oleh Eom et al. (2015) yaitu pemodelan berbasis energi (*energy-based model*). Secara umum, model ini membagi daerah *beam-column joint* menjadi tiga bagian yaitu elemen balok-kolom elastis yang mensimulasikan perilaku lentur dari balok dan kolom, *rigid element* pada inti *joint*, dan *rotational spring element* yang terdiri dari dua bagian yaitu *Envelope Curve* dan *Cyclic Curve*. Model yang digunakan Eom beserta dapat dilihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1. Pemodelan Joint Berbasis Energi**

## 3. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini ditinjau sebuah bangunan GLD berupa ruko empat lantai dengan detail yang dijelaskan dalam **Gambar 2**. Bangunan GLD tersebut akan dimodelkan menggunakan SAP2000 secara nonlinear sehingga dapat memberikan perilaku yang lebih realistis. Pemodelan secara nonlinear ini juga meliputi pendefinisian *hinge* yang dapat bekerja untuk menggambarkan perilaku nonlinear dari elemen struktur beserta kerusakan yang dapat timbul setelah mengalami pembebanan. Dengan data tulangan seperti **Gambar 3**.



**Gambar 2. Denah Tipikal Bangunan GLD Lantai 1, Lantai 2-4, dan Tampak Bangunan**

TIPE	KOLOM 4 METER DAN KOLOM 3,5 METER	TIPE	SEMUA BALOK
PENAMPANG		PENAMPANG	
TULANGAN UTAMA	8D16	TULANGAN ATAS	2D19
TULANGAN SENGKANG	2Ø10-200	TULANGAN BAWAH	2D19
		TULANGAN SENGKANG	2Ø10-200

**Gambar 3. Data Tulangan Kolom dan Balok yang Terpakai**

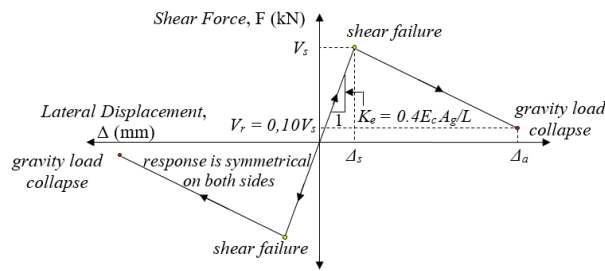
### 3.1. Pemodelan Lentur Kolom

Pemodelan nonlinear pada penampang beton bertulang mengacu kepada penelitian Mander et al. (1988) yang membagi penampang beton bertulang menjadi area *confined* yang merupakan area yang dikekang oleh sengkang dan dikenal juga dengan istilah *core* atau inti beton bertulang dan area *unconfined* yang merupakan area diluar *core*. Dalam penelitian Mander (1988) disebutkan bahwa area *confined* mengalami peningkatan kuat tekan beton terhadap area *unconfined*. Selain itu, dalam penelitian ini juga diperhitungkan dampak dari *cracked section* yang akan mengacu pada ASCE 41-13 (2013) Tabel 10-5.

Dalam penelitian ini, digunakan *Fiber P-M2-M3 hinge* pada SAP2000 untuk memodelkan perilaku lentur pada elemen kolom. Pemodelan *Fiber P-M2-M3 hinge* memerlukan input berupa panjang sendi plastis yang dihitung menggunakan perumusan yang terdapat dalam Paulay & Priestley (1992).

### 3.2. Pemodelan Geser Balok dan Kolom

Dalam penelitian ini, digunakan *Shear V2* atau *Shear V3 hinge* pada SAP2000 untuk memodelkan perilaku geser dari balok maupun kolom. Untuk mendefinisikan *shear hinges* pada SAP2000, perlu diinputkan sebuah *backbone curve* yang akan menggambarkan perilaku geser dari elemen struktur tersebut. *Backbone curve* yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 4** oleh Suthasit (2007). Komponen dari *backbone curve* dihitung dengan menggunakan perumusan oleh Sezen & Moehle (2006). Selain *backbone curve*, didefinisikan juga *hysteresis type* pada *shear hinges* menggunakan tipe Pivot yang telah tersedia.



**Gambar 4. Backbone Curve pada Pemodelan Geser**

### 3.3. Pemodelan Nonlinear *Beam-Column Joint*

Pemodelan pada *beam-column joint* mengikuti pemodelan berbasis energi yang dikembangkan oleh Eom et al. (2015) menggunakan Opensees dan kemudian telah diteliti oleh Octaviani & Kurniawan (2018) menggunakan SAP2000. *Rotational spring element* didefinisikan menggunakan sendi *Moment M2* dan *M3* dengan *backbone curve* berupa kurva *Moment-Rotation* yang digambarkan mengikuti *Envelope Curve* yang dikembangkan dalam penelitian Eom et al. (2015) sedangkan untuk *hysteresis type* juga digunakan tipe *Pivot*, *spring element* ini juga akan sekaligus menggambarkan perilaku lentur dari balok. *Rigid element* pada inti *joint* didefinisikan menggunakan *end length offset* pada SAP2000.

### 3.4. Pemodelan Dinding Bata

Dalam penelitian ini, Dinding bata dimodelkan dengan dua *diagonal strut* yang mengacu pada FEMA 356 (2000) secara *in-plane* saja menggunakan *Axial P hinge* dengan tipe histeresis menggunakan *Pivot*.

### 3.5. Metode Analisis Gempa

Untuk mengevaluasi kinerja struktural dari bangunan GLD sebelum dan sesudah bangunan diberi perkuatan dilakukan analisis dinamis nonlinear tiga dimensi *time history*. Gempa yang digunakan sebagai acuan adalah Gempa *El-Centro* pada arah *East West (EW)* dan *North South (NS)* yang diperoleh dari PEER Strong Ground Motion Database NGA Record (2014), gempa *El-Centro* ini sendiri kemudian disesuaikan terhadap nilai *PGA* respon spektrum wilayah gempa Surabaya. Analisis akan dilakukan dengan dua skenario. Dimana skenario A arah gempa *EW* searah sumbu *Y* dan *NS* searah sumbu *X* dan skenario B arah gempa *EW* searah sumbu *X* dan *NS* searah sumbu *Y*.

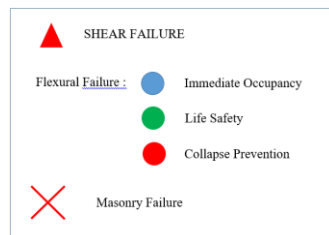
### 3.6. Penentuan Skema Retrofit

Setelah analisis terhadap bangunan GLD selesai dilakukan, kerusakan-kerusakan yang timbul akan menjadi indikator untuk penentuan skema dari strategi retrofit dan metode perkuatan yang akan digunakan yaitu *BRB* dan *CFRP jacketing*. Setelah diberikan perkuatan, analisis gempa akan dilakukan kembali untuk mengevaluasi tingkat keefektifan dari skema retrofit yang digunakan.

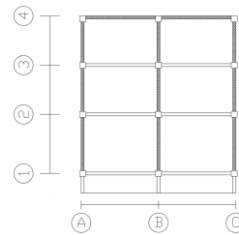
## 4. EVALUASI KINERJA BANGUNAN GLD

Untuk meninjau kerusakan pada bangunan GLD, dilakukan pendefinisian kriteria kerusakan (*Acceptance Criteria*) pada setiap *hinge* untuk mengetahui kondisi apakah terjadi sendi plastis maupun kerusakan. Kriteria kerusakan dibagi menjadi kondisi *IO (Immediate Occupancy)*, *LS (Life Safety)*, dan *CP (Collapse Prevention)*. Untuk kerusakan lentur pada kolom, kriteria kerusakan mengacu pada tabel 10-8 ASCE 41-13 (2013).

Untuk *hinge Shear V2* maupun *Shear V*, *Acceptance Criteria* dapat langsung diatur pada *backbone curve* saat pendefinisian *hinge* dengan kriteria dimana kondisi LS diatur saat *shear failure* pada *backbone curve* tercapai. Karena setelah melewati puncak *shear strength* akan terjadi gagal geser, maka kriteria kerusakan untuk sendi geser disimpulkan menjadi satu kriteria saja yaitu *shear failure* setelah melewati titik puncak dari *shear strength* (titik  $V_s, \Delta_s$  pada *backbone curve*). Untuk *hinge Moment M2* maupun *M3* pada balok, *Acceptance Criteria* juga langsung ditetapkan pada *backbone curve* saat pendefinisian *hinge* dengan kriteria yang mengacu pada ASCE 41-13 (2013). Sedangkan untuk *Axial P hinge* pada *diagonal strut* dinding bata, kondisi LS ditetapkan pada titik *yield* atau leleh dari *backbone curve* sedangkan kondisi CP ditetapkan pada saat *stress-strain* yang terjadi telah mencapai ujung dari *strength loss* yaitu pada saat tersisa *residual strength*.



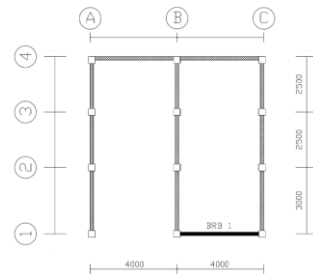
Gambar 5. Kriteria Kerusakan



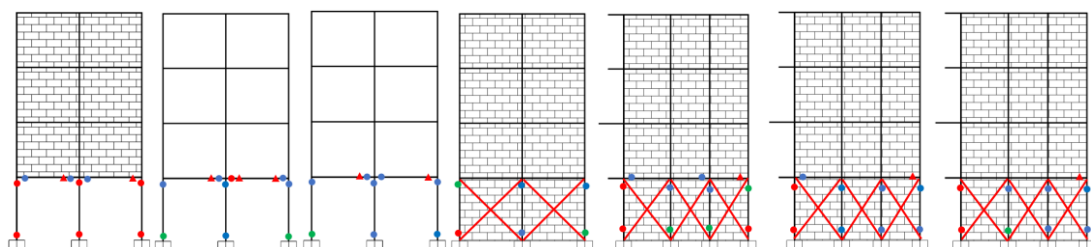
Gambar 6. Pemetaan As Portal Bangunan

## 5. DESAIN DAN HASIL EVALUASI KINERJA BANGUNAN GLD SETELAH DIPERKUAT TERHADAP GEMPA

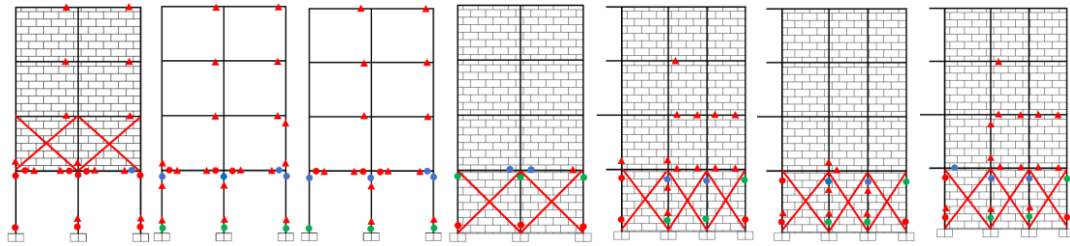
Strategi retrofit yang dipakai berfokus untuk meningkatkan kekakuan dan kekuatan lantai satu dari bangunan GLD dengan menggunakan BRB dan untuk menghilangkan kegagalan geser pada elemen struktur bangunan GLD tersebut dipakai FRP Jacketing. Bangunan GLD direncanakan diberi perkuatan BRB pada bangunan seperti pada **Gambar 7**. Luasan BRB yang dipakai sebesar 3603,5 mm<sup>2</sup>. sedangkan CFRP dipasang 1 layer dengan tebal 0,129 mm. Untuk **Gambar 8**. hingga **Gambar 11**. Gambar ditampilkan dengan urutan : portal 1, portal 2, portal 3, portal 4, portal A, portal B, dan portal C.



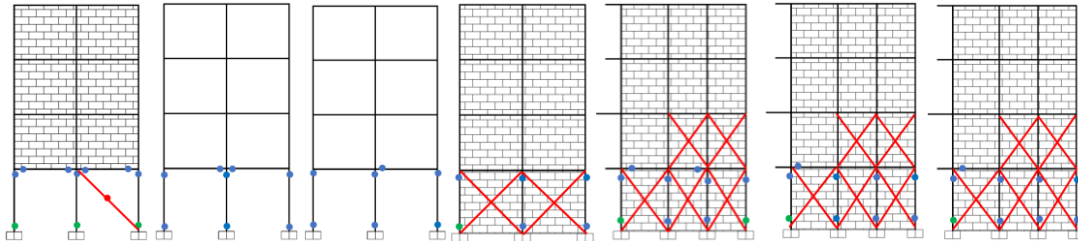
Gambar 7. Skema Perletakan BRB pada Lantai 1



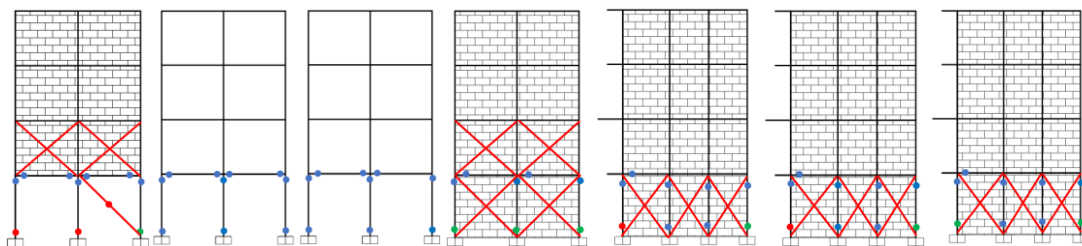
Gambar 8. Kerusakan Bangunan GLD Gempa Skenario A



Gambar 9. Kerusakan Bangunan GLD Gempa Skenario B

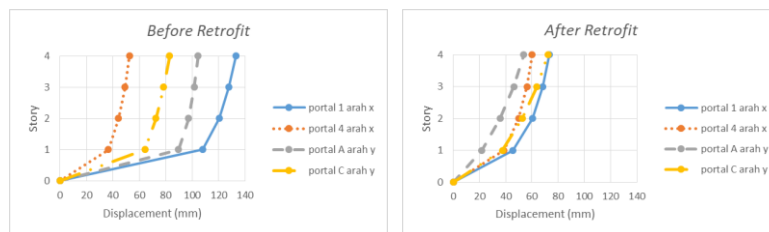


Gambar 10. Kerusakan Bangunan GLD dengan Retrofit Gempa Skenario A

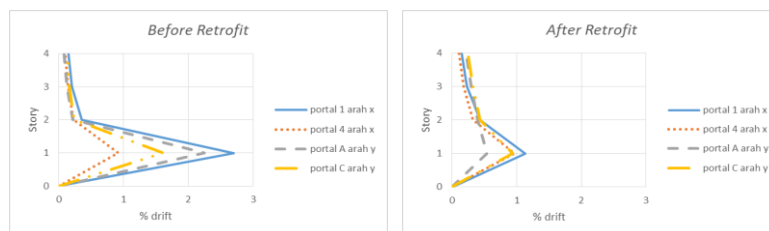


Gambar 11. Kerusakan Bangunan GLD dengan Retrofit Gempa Skenario B

Dari hasil yang didapat, kegagalan geser pada sejumlah balok bisa teratasi dengan baik dengan menggunakan CFRP. Sedangkan kegagalan geser dan lentur pada kolom lantai satu bisa teratasi dengan adanya pemasangan BRB. Sehingga perkuatan dengan kombinasi antara CFRP dan BRB merupakan perkuatan bangunan GLD yang cukup efektif baik saat gempa sebelum dan sesudah ditukar.



Gambar 12. Perbandingan *Displacement* Sebelum dan Sesudah Retrofit Gempa Skenario A.



Gambar 13. Perbandingan *Story Drift* Sebelum dan Sesudah Retrofit Gempa Skenario B.

Dapat dilihat pada gambar ketika bangunan GLD diberi perkuatan, displacement yang terjadi berkurang dibandingkan displacement yang terjadi saat bangunan GLD belum diberikan perkuatan. Selain itu, seperti ditunjukkan dari grafik displacement dan drift bahwa kegagalan *soft story* pada bangunan GLD dapat teratasi dengan drift yang semula lebih dari 2,5% sekarang menjadi kurang dari 1,5%. Selain itu

dari grafik *displacement* juga terlihat bahwa semula bangunan GLD mengalami torsi, setelah diperkuat torsi menjadi hilang.

## 6. KESIMPULAN

Hasil analisis dijelaskan melalui grafik dari *maximum floor displacement*, *maximum story drift*, dan lokasi dimana elemen struktur seperti kolom, balok, dan dinding bata mengalami sendi plastis. Sehingga kesimpulan yang diperoleh dari penelitian kali ini adalah :

1. Perkuatan BRB hanya mampu membuat kolom tahan terhadap gempa baik untuk kegagalan lentur dan geser sedangkan untuk geser balok dapat diatasi dengan menambahkan CFRP. Perkuatan kombinasi BRB dengan CFRP efektif dalam bangunan GLD yang ditinjau.
2. Dalam mendesain luasan BRB sangat diperlukan perhitungan story strength jika di desain terlalu besar, maka kapasitas BRB juga semakin besar menyebabkan story strength lantai 1 bertambah. Jika story strength lantai 1 jauh lebih besar daripada lantai 2 maka, kegagalan soft story lantai 1 bisa pindah ke lantai 2.
3. Dalam perkuatan, tujuan utama adalah supaya bangunan tidak runtuh. Sehingga jika kolom terdapat sendi plastis *collapse prevention* hanya pada bagian bawah sedangkan pada bagian atas masih *immediate occupancy*, bangunan masih belum runtuh.

## 7. DAFTAR REFERENSI

- ASCE/SEI. (2013). ASCE 41-13 : *American Society of Civil Engineers : Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*.  
Computers & Structures, I. (2017). *CSI Analysis Reference Manual*.  
Connor, J., Wada, A., Iwata, M., & Huang, Y. (1997). *Damage-Controlled Structures*. (APRIL), 423-431.  
Eom, T., Hwang, H., & Park, H. (2015). "Energy-Based Hysteresis Model for Reinforced Concrete Beam-Column Connections". *ACI Structural Journal*, 112(3). <https://doi.org/10.14359/51687404>  
FEMA. (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings". *Rehabilitation Requirements*(1), 1-518.  
Iwata, M. (2004). "Applications-design of buckling restrained braces in Japan". *13th World Conference on Earthquake Engineering*(3208).  
Mander, J. B.; Priestley, M. J. N.; Park, P. (1988). "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete". *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826  
Octaviani, V., & Kurniawan, P. C. (2018). *Evaluasi Permodelan Non-Ductile Beam-Column Joint*. Surabaya: Universitas Kristen Petra.  
Paulay, T., & Priestley, M. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building*. John Wiley & Sons, Inc.  
PEER. (2014). *PEER Ground Motion Database*. Retrieved from <https://ngawest2.berkeley.edu/>  
Saadatmanesh, H., Ehsani, M., & Li, M. (1994). "Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber-Composite Straps." *ACI Structural Journal*, 91(4), 434-447.  
Sezen, H., & Moehle, J. (2006). "Seismic Tests of Concrete Columns with Light Transverse Reinforcement". *ACI Structural Journal*, 103(6), 842-849.  
Suthasit, M. (2007). *Nonlinier Modeling of Gravity Load Design Reinforced Concrete Buildings for Seismic Performance Evaluation*. (Master thesis no ST-07-6, Asian Institute of Technology, 2007). Bangkok: Asian Institute of Technology.  
Universitas Kristen Petra: Tim Survei Lapangan. (2005). *Survei Kondisi Bangunan di Nias Pasca Gempa Bumi*. Surabaya: Universitas Kristen Petra.  
Universitas Kristen Petra: Tim Survei Lapangan. (2006). *Survei Kondisi Bangunan di Yogyakarta Pasca Gempa Bumi*. Surabaya: Universitas Kristen Petra.  
Universitas Kristen Petra: Tim Survei Lapangan. (2009). *Survei Kondisi Bangunan di Padang Pasca Gempa Bumi*. Surabaya: Universitas Kristen Petra.