

EVALUASI KINERJA BANGUNAN MODULAR BERDASARKAN SNI 1726:2012: STUDI KASUS TERHADAP BANGUNAN DI PORT HEDLAND, WESTERN AUSTRALIA

Titania Gunawan¹, Gabriella Yuki², Benjamin Lumantarna³, and Fransisca Wijaya⁴

ABSTRAK : Penggunaan bangunan modular untuk bangunan tinggi semakin banyak digunakan karena meminimalkan waktu pengerjaan proyek dan kemudahan dalam perakitan. Namun, selama ini bangunan modular tidak dibangun di daerah rawan gempa, sehingga diperlukan adanya evaluasi terhadap kinerja bangunan apabila ditinjau terhadap beban gempa. Pada penelitian ini, kinerja bangunan eksisting di Port Hedland, Western Australia akan dievaluasi terhadap SNI 1726:2012. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari kinerja bangunan modular dan sambungan struktur terhadap beban gempa di Pangkal Pinang, Indonesia dengan berbagai periode ulang. Kemudian, simpangan lantai, simpangan antar lantai, dan *drift ratio* akan dibandingkan dengan SNI 1726:2012 dan FEMA 356-2000 Tabel C1-3. Untuk memperoleh kinerja struktur, dilakukan analisis nonlinier riwayat waktu dengan menggunakan program SAP 2000 V.18.2.0 dengan beban gempa El Centro yang telah disesuaikan dengan kondisi tanah di kota Pangkal Pinang dengan berbagai periode ulang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada arah X, bangunan kolaps ketika dibebani gempa periode ulang 1000 dan 2500 tahun. Pada arah Y, bangunan kolaps ketika dibebani gempa periode ulang 2500 tahun. Pada arah XY, bangunan kolaps ketika dibebani gempa periode ulang 200, 500, 1000, dan 2500 tahun.

KATA KUNCI: bangunan modular, SNI 1726:2012, FEMA 356-2000, simpangan antar lantai, *drift ratio*, analisis nonlinier riwayat waktu.

1. PENDAHULUAN

Penggunaan bangunan modular untuk bangunan tinggi semakin banyak digunakan di negara-negara maju, seperti Singapura, China, dan Australia karena bangunan modular dapat diaplikasikan menjadi berbagai macam bentuk dan tinggi bangunan (Lawson et al, 2011). Konsep dari konstruksi bangunan modular adalah modul berukuran satu ruang yang telah difabrikasi dan *quality control* sesuai dengan standar yang ada. Kemudian modul tersebut dibawa menuju ke lokasi konstruksi dan dilakukan perakitan antara satu modul dengan modul lain sehingga membentuk satu bangunan (Navaratnam et al, 2019). Hal ini membuat konstruksi bangunan modular memiliki banyak kelebihan, diantaranya adalah menghemat waktu pelaksanaan, mengurangi jumlah tenaga kerja, serta mengurangi sisa material (Gann et al., 1996).

Meskipun bangunan modular memiliki banyak dampak positif, namun pengaplikasian bangunan modular untuk bangunan tinggi memiliki risiko terhadap beban lateral. Bangunan modular dilengkapi dengan bresing dan sambungan pada tiap elemen untuk menahan beban lateral, dimana sambungan menjadi kunci dari kinerja bangunan modular secara keseluruhan. Keberadaan sambungan berfungsi untuk mentransferkan beban, menutup celah antar modul, dan membatasi pergerakan bangunan modular sehingga dapat mengurangi defleksi pada bangunan. Setiap modul biasanya dihubungkan menggunakan sambungan vertikal, sambungan horizontal, dan sambungan kolom-balok seperti yang dapat dilihat pada

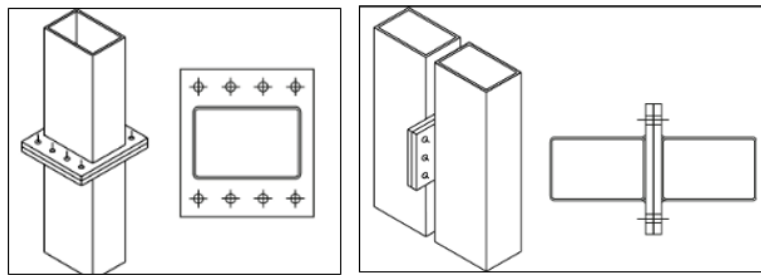
¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416046@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416142@john.petra.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, bluman@petra.ac.id

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, fransisca.wijaya@petra.ac.id

Gambar 1. Sambungan vertikal terdapat pada modul atas dan bawah. Sambungan horizontal ada pada modul kanan dan kiri. Beban lateral yang diterima di setiap lantai akan ditransferkan melalui sambungan horizontal ke bresing dan sambungan vertikal berfungsi untuk meneruskan beban lateral ke pondasi.



Gambar 1. Contoh Sambungan Vertikal dan Horizontal (Lacey et al., 2019)

Selama ini, penerapan bangunan modular hanya terbatas pada wilayah yang jarang terkena gempa bumi, sehingga otomatis desain bangunan modular juga mengikuti peraturan di wilayah tersebut. Sedangkan Indonesia merupakan daerah rawan gempa bumi karena dilalui oleh jalur pertemuan tiga lempeng tektonik dan terletak di area cincin api pasifik (*ring of fire*) (Sari et al, 2014). Kejadian gempa bumi yang seringkali terjadi di Indonesia, menjadi dasar untuk melakukan analisis *hazard* gempa untuk memperbaharui peta pemetaan tingkat risiko bencana alam gempa, dan dari analisis tersebut, dapat dirumuskan peta pemetaan tingkat risiko gempa bumi, yaitu peta percepatan puncak (PGA) dengan perioda ulang gempa tertentu: 50, 100, 200, 500, 1000, 2500, 5000, dan 10000 tahun.

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian untuk menganalisis bangunan modular eksisting di Australia, yang bukan merupakan negara rawan gempa, ketika diaplikasikan dengan beban gempa di Pangkal Pinang, Indonesia. Pemilihan lokasi beban gempa di Pangkal Pinang karena merupakan kota dengan *low seismic hazard*, sehingga sesuai dengan kondisi desain bangunan modular eksisting yang berada di Australia. Lalu, bangunan eksisting akan dianalisis dengan gempa periode ulang 50, 100, 200, 500, 1000, dan 2500 tahun.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Bangunan Modular

Bangunan modular adalah bangunan prefabrikasi yang terdiri dari beberapa bagian yang disebut sebagai modul (Lacey et al, 2018). Material yang digunakan untuk membuat modul biasanya adalah material baja atau beton. Bangunan modular dari baja atau MSB (*Modular Steel Buildings*), menggunakan portal baja sebagai struktur utamanya (Lacey et al., 2019). Penggunaan MSB banyak digunakan pada bangunan yang memiliki satu sampai enam tingkat, karena pertimbangan biaya yang lebih murah, kualitas yang baik, dan pemasangan yang cepat (Sultana & Youssef, 2018).

2.1.1 Konstruksi Bangunan Modular

Sistem konstruksi bangunan modular dikembangkan sebagai alternatif untuk konstruksi konvensional, dimana perakitan modul-modul dari sebuah bangunan sudah dilakukan di pabrik. Setelah modul-modul selesai dirakit, kemudian dibawa ke lokasi proyek dan dilakukan pemasangan antar modul. Proses pemasangan modul dilapangan terbagi menjadi tiga bagian (Gibb, 1999; Staib et al, 2008), yaitu pengangkatan, penempatan, dan penyambungan. Pengangkatan modul dilakukan dengan menggunakan *crane* dan disesuaikan dengan posisi yang telah ditentukan. Tiap-tiap modul yang telah dipasang kemudian disambung menggunakan sambungan antar modul berupa las atau baut (*inter-module connections*).

2.1.2 Sambungan antar Modul

Sambungan antar modul dapat berupa las, baut maupun menggunakan material komposit, dan yang paling umum digunakan adalah sambungan baut karena dalam penggunaannya lebih praktis, dan dapat diatur, sehingga dapat mengurangi waktu konstruksi (Lacey et al., 2018). Sambungan antar modul dapat berupa sambungan dengan arah horizontal, sambungan arah vertikal, maupun keduanya (Lacey et al., 2019). Sambungan arah horizontal dapat ditemukan pada modul-modul yang bersebelahan, dan

sambungan arah vertikal pada modul yang disusun. Perilaku dari sambungan antar modul dapat diketahui tergantung pada kekuatan, kekakuan, dan kapasitas deformasi. Kekuatan sambungan dapat ditentukan dari material plat baja dan mutu baut yang digunakan.

Model sambungan antar modul yang diteliti oleh Gunawardena pada tahun 2016 terdapat pada bangunan eksisting di Australia dan kemudian penelitian dilanjutkan oleh Lacey et al. pada tahun 2018 (Gunawardena, 2016; Lacey et al., 2018). Baik sambungan vertikal maupun sambungan horizontal pada bangunan dimodelkan sebagai pegas yang menyalurkan beban lateral antar modul. Arah kekakuan pegas ditetapkan sebagai kekakuan geser atau kekakuan aksial dari sambungan antar modul.

Kekakuan geser sambungan antar modul dapat dihitung dengan rumus (Van Gaasbeek, 2011):

$$k_{\tau} = G \frac{As}{L}$$

Dimana, G adalah modulus geser (N/mm^2), As adalah luas penampang baut (mm^2), dan L adalah panjang baut yang menembus plat (mm). Sedangkan, kekakuan sambungan untuk menahan tarik dapat diperoleh dengan menggunakan rumus dari (Shigley 1976):

$$k = \frac{\pi E d \tan \alpha}{\ln \frac{(2t \tan \alpha + D - d)(D + d)}{(2t \tan \alpha + D + d)(D - d)}}$$

Dimana, E adalah modulus elastisitas (N/mm^2), t adalah tebal plat (mm), D adalah diameter kepala baut yang diasumsikan sebesar 1,5d (mm), d adalah diameter baut (mm), dan α adalah sudut area tarik yaitu sebesar 30° .

Sehingga kekakuan pegas untuk sambungan secara keseluruhan adalah:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

2.2 SNI 1726:2012 (Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung)

Peraturan mengenai bangunan terhadap gempa di Indonesia sudah ada sejak dulu, dimana peraturan pertama yang diterbitkan adalah Peraturan Muatan Indonesia 1970, NI-18 (Lumantarna, 2004). Seiring berjalannya waktu, peraturan tersebut terus menerus mengalami perubahan terutama pada bagian peta gempa yang selalu diperbaharui. Pada SNI 1726:2012, nilai awal S1 dan SS berbeda-beda pada setiap wilayah gempa, berbeda dengan SNI 1726:2002 yang membagi peta gempa menjadi enam zona. Selain itu, beberapa komponen perencanaan bangunan terhadap gempa juga diatur dalam SNI 1726:2012, diantaranya adalah batas simpangan antar lantai dan analisis berdasarkan kinerja.

2.3 Analisis Nonlinier Riwayat Waktu (*Nonlinear Time History Analysis*)

Analisis Nonlinier Riwayat Waktu adalah metode yang paling akurat untuk menganalisis respons dinamik struktur terhadap beban gempa (Gunawardena, 2016). Ada dua metode analisis yang digunakan dalam analisis nonlinier riwayat waktu, yaitu dengan ragam riwayat waktu (*modal time history analysis*) atau *Fast Nonlinear Analysis* (FNA) dan dengan integrasi numerik langsung (*direct integration analysis*). Analisis ragam riwayat waktu kurang akurat jika dibandingkan dengan analisis integrasi langsung karena mempunyai batasan terhadap nonlinearitas (Siregar, 2010). Sedangkan metode analisis integrasi langsung menggunakan *time-stepping*.

2.4 Analisis *Performance Based Design*

Performance based design atau evaluasi terhadap kinerja bangunan adalah proses evaluasi untuk menentukan kinerja bangunan berdasarkan gempa yang direncanakan dengan pemahaman terhadap aspek resiko keselamatan, kesiapan pakai, dan resiko kerugian finansial yang timbul akibat gempa. Evaluasi terhadap kinerja bangunan perlu dilakukan agar pada saat gempa terjadi struktur harus mampu menerima gaya gempa tersebut.

Pada penelitian ini, digunakan FEMA 356-2000 Tabel C1-3 sebagai dasar untuk menentukan kinerja bangunan berdasarkan *drift ratio*. *Drift ratio* adalah simpangan antar lantai pada bangunan dibandingkan dengan tinggi lantai tersebut. Setidaknya ada tiga kategori atau tingkat kinerja yang dijelaskan di dalamnya.

a. *Immediate Occupancy (IO)*

Pada kategori ini, struktur bangunan tidak mengalami kerusakan struktural dan komponen nonstruktural hanya mengalami kerusakan minor. Terjadi tekuk dan leleh pada elemen bracing struktur dalam jumlah yang sedikit. Bangunan masih dapat digunakan pasca gempa tanpa terganggu masalah perbaikan. *Drift ratio* yang terjadi pada tahap ini tidak boleh melebihi 0,5%.

b. *Life Safety (LS)*

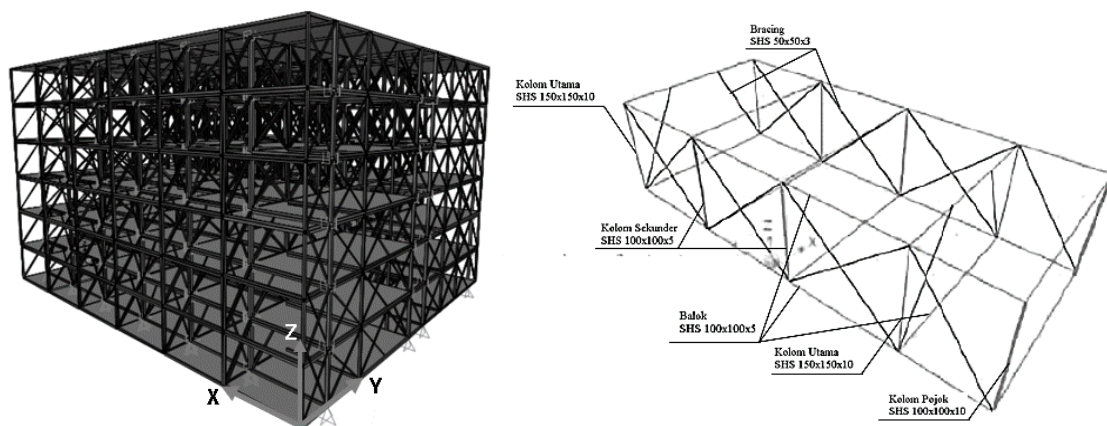
Pada kategori ini, terjadi kerusakan struktural pada bangunan, akan tetapi tidak sampai terjadi keruntuhan. Beberapa bracing mengalami kerusakan berupa leleh dan tekuk, serta ada kemungkinan terjadi kegagalan pada beberapa sambungan. Kekakuan struktur telah berkurang, hanya saja bangunan tidak runtuh secara parsial maupun total. Bangunan masih dapat digunakan kembali pasca gempa setelah dilakukan perbaikan. *Drift ratio* yang terjadi pada tahap ini berkisar antara 0,5% sampai dengan 1,5%.

c. *Collapse Prevention (CP)*

Pada kategori ini struktur bangunan mengalami kerusakan yang signifikan akibat gempa. Kekakuan struktur juga berkurang secara signifikan. Adanya kemungkinan material bangunan berjatuh. Breising mengalami leleh dan tekuk yang besar sehingga seluruh breising mengalami kerusakan secara total. Bangunan tidak memungkinkan untuk dilakukan perbaikan dan tidak aman untuk digunakan kembali pasca gempa. *Drift ratio* yang terjadi pada tahap ini dibatasi hingga 2%.

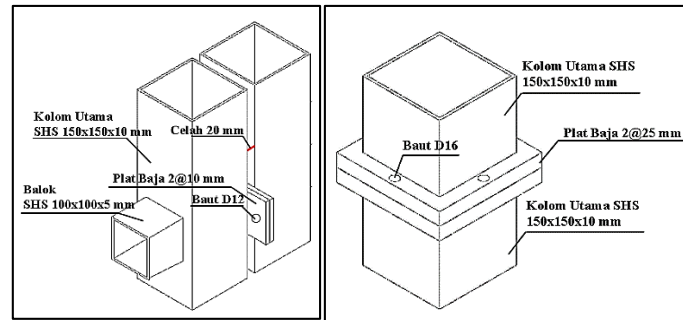
3. METODOLOGI PENELITIAN

Bangunan yang akan dievaluasi adalah bangunan modular eksisting *Concorde South Apartment* di Port Hedland, Western Australia yang didesain menggunakan Standar Australia dan terdiri dari enam tingkat (Lacey et al, 2018). Pada setiap tingkat terdapat 12 modul, masing-masing berdimensi 11,885 x 4,95 x 2,95 meter. Permodelan bangunan dapat dilihat pada **Gambar 2**. Elemen penyusun kolom, balok, dan bresing terbuat dari profil baja *square hollow section* (SHS) dengan standar mutu AS/NZ 1163 C450 ($f_y=450$ MPa, $f_u=500$ MPa). Setiap modul mempunyai berat total 26 ton dan terdiri dari 10 kolom. Pada sumbu X bangunan, menggunakan sistem penahan gempa bresing eksentris berbentuk *chevron*, sedangkan pada sumbu Y bangunan menggunakan sistem bresing konsentrik berbentuk diagonal dan silang (X). Pada arah horizontal, terdapat celah antar modul sebesar 20 mm dan dihubungkan dengan plat $t=10$ mm, sambungan menggunakan baut 2D12. Pada arah vertikal, modul satu dan yang lain memiliki celah sebesar 150 mm dan dihubungkan dengan plat $t=25$ mm, sambungan menggunakan baut 4D16.

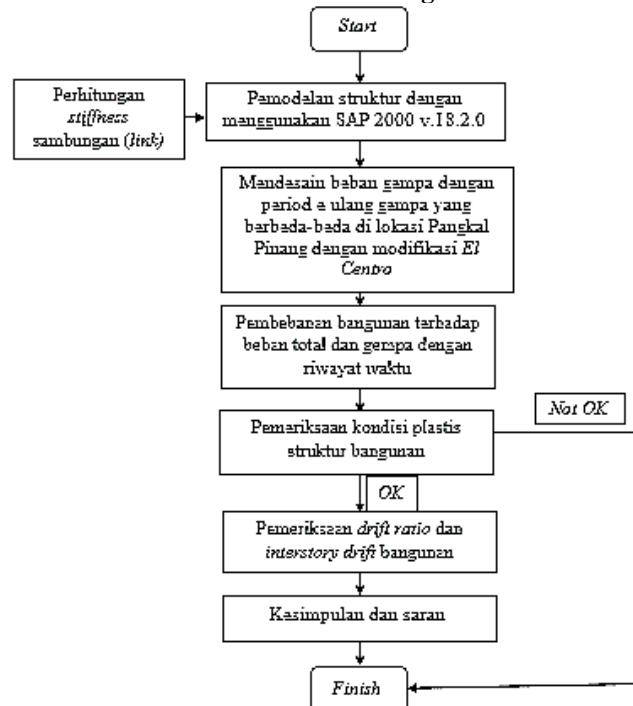


Gambar 2. Permodelan Bangunan

Dengan menggunakan software SAP v.18.2.0., bangunan modular ditinjau terhadap beban gempa arah X, arah Y, dan gabungan arah X dan Y menggunakan beban gempa El Centro yang telah disesuaikan dengan kondisi tanah lunak di Pangkal Pinang dengan periode ulang 50, 100, 200, 500, 1000 dan 2500 tahun. Permodelan sambungan antar modul dimodelkan dengan menggunakan *nonlinier link* seperti pada **Gambar 3**. Gempa modifikasi El Centro yang digunakan adalah El Centro North-South untuk arah X dan El Centro East-West untuk arah Y dengan durasi selama 30 detik. Alur pengerjaan penelitian dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 3. Permodelan Sambungan Antar Modul



Gambar 4. Flowchart Penelitian

4. HASIL DAN DISKUSI

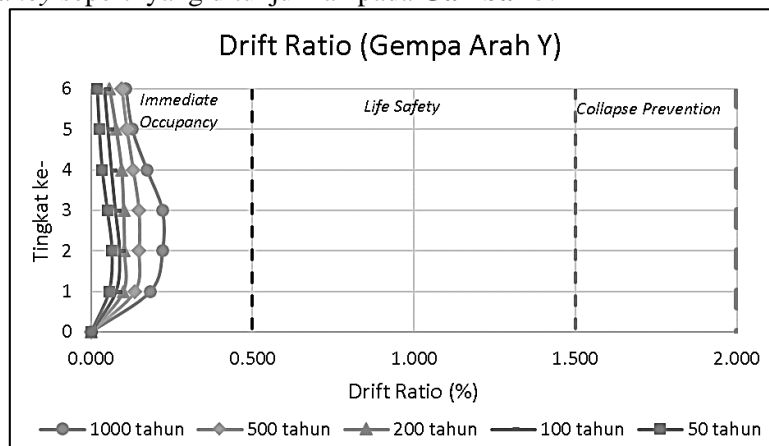
Hasil yang didapatkan berupa sendi plastis, simpangan lantai, simpangan antar lantai dan drift ratio masing-masing dari gempa arah X, arah Y, dan arah XY. Hasil tersebut kemudian akan dievaluasi berdasarkan persyaratan yang telah ditetapkan oleh SNI 1726:2012 dan FEMA 356-2000 untuk mengetahui kinerja struktur bangunan modular terhadap beban gempa dengan berbagai macam periode ulang.

Pada gempa arah Y, struktur bangunan *collapse* pada periode ulang 2500 tahun, sehingga tidak perlu dievaluasi. Simpangan antar lantai ditunjukkan pada **Tabel 1**, dimana semua simpangan antar lantai bangunan sudah memenuhi persyaratan.

Tabel 1. Simpangan Antar Lantai Struktur dengan Gempa Arah Y

Periode Tingkat ke-	SIMPANGAN ANTAR LANTAI (mm)					Simpangan Antar Lantai Ijin (mm)	Keterangan
	1000 tahun	500 tahun	200 tahun	100 tahun	50 tahun		
6	3.190	2.830	1.700	1.220	0.562	59	Memenuhi Syarat
5	3.780	3.280	2.310	1.530	0.760	59	Memenuhi Syarat
4	5.130	3.860	2.810	1.850	1.030	59	Memenuhi Syarat
3	6.560	4.380	2.990	2.210	1.510	59	Memenuhi Syarat
2	6.570	4.400	3.060	2.590	1.940	59	Memenuhi Syarat
1	5.450	4.010	2.970	2.280	1.670	59	Memenuhi Syarat
0	0	0	0	0	0	-	Memenuhi Syarat

Sedangkan untuk evaluasi kinerja bangunan berdasarkan *drift ratio*, struktur masih ada dalam tahap *Immediate Occupancy* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5**.



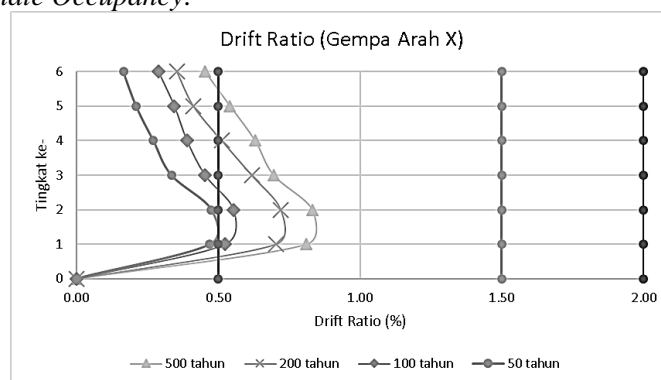
Gambar 5. Drift Ratio Struktur dengan Gempa Arah Y

Struktur yang dibebani dengan gempa arah X mempunyai tingkat kerusakan yang lebih besar, dimana struktur *collapse* pada periode ulang 1000 dan 2500 tahun. Namun untuk periode ulang yang lain, simpangan antar lantai masih memenuhi persyaratan seperti yang terlihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Simpangan Antar Lantai Struktur dengan Gempa Arah X

Periode Tingkat ke-	SIMPANGAN ANTAR LANTAI (mm)				Simpangan Antar Lantai Ijin (mm)	Keterangan
	500 tahun	200 tahun	100 tahun	50 tahun		
6	13.35	10.45	8.51	4.89	59	Memenuhi Syarat
5	15.98	12.18	10.17	6.22	59	Memenuhi Syarat
4	18.58	15.13	11.49	8.01	59	Memenuhi Syarat
3	20.51	18.25	13.36	9.88	59	Memenuhi Syarat
2	24.53	21.29	16.33	14.03	59	Memenuhi Syarat
1	23.92	20.78	15.43	13.89	59	Memenuhi Syarat
0	0	0	0	0	-	Memenuhi Syarat

Drift ratio pada struktur yang dibebani gempa arah X, sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 6**, termasuk dalam kategori *Life Safety*, kecuali untuk gempa periode ulang 50 tahun yang masih berada dalam kategori *Immediate Occupancy*.



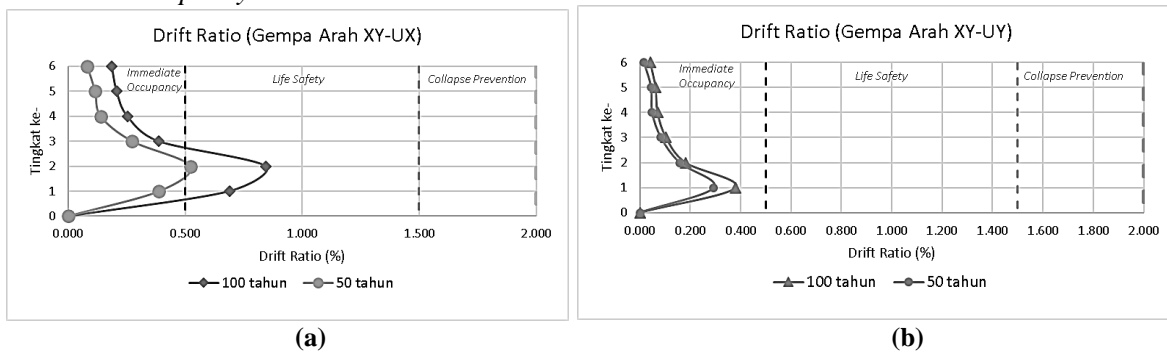
Gambar 6. Drift Ratio Struktur dengan Gempa Arah X

Sementara itu, struktur yang dibebani dengan gempa arah X dan Y sekaligus *collapse* di hampir semua periode ulang, kecuali pada periode ulang 50 dan 100 tahun. Simpangan antar lantai yang terjadi pada struktur ditinjau dari dua arah, yaitu pada sumbu X bangunan (UX) dan sumbu Y bangunan (UY). **Tabel 3** menunjukkan bahwa simpangan antar lantai lebih besar daripada struktur yang dibebani dengan gempa satu arah, namun masih memenuhi persyaratan sesuai SNI 1726:2012.

Tabel 3. Simpangan Antar Lantai Struktur dengan Gempa Arah X dan Y

Periode Tingkat ke-	SIMPANGAN ANTAR LANTAI ARAH X (mm)		SIMPANGAN ANTAR LANTAI ARAH Y (mm)		Simpangan Antar Lantai Ijin (mm)	Keterangan
	100 tahun	50 tahun	100 tahun	50 tahun		
6	5.520	2.420	1.230	0.510	59	Memenuhi Syarat
5	6.130	3.410	1.850	1.330	59	Memenuhi Syarat
4	7.480	4.100	2.080	1.450	59	Memenuhi Syarat
3	11.410	8.040	3.080	2.480	59	Memenuhi Syarat
2	24.950	15.390	5.350	4.650	59	Memenuhi Syarat
1	20.320	11.450	11.230	8.640	59	Memenuhi Syarat
0	0	0	0	0	-	Memenuhi Syarat

Jika ditinjau berdasarkan *drift ratio* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7(a)**, arah sumbu X bangunan pada periode ulang 100 tahun berada dalam kategori *Life Safety* dengan nilai *drift ratio* sebesar 0.842%, sedangkan untuk periode ulang 50 tahun berada pada kategori *Immediate Occupancy*. Pada **Gambar 5(b)** juga dapat terlihat bahwa *drift ratio* bangunan pada sumbu Y masih digolongkan ke dalam *Immediate Occupancy*.



Gambar 7. Drift Ratio Struktur dengan Gempa Arah X dan Y; (a) UX; (b) UY

5. REKAPITULASI

Rekapitulasi hasil evaluasi bangunan modular eksisting terhadap beban gempa di Pangkal Pinang dirangkum pada **Tabel 4**. Hasil evaluasi adalah berdasarkan sendi plastis yang terjadi, simpangan antar lantai dan *drift ratio* yang terjadi pada struktur bangunan dibandingkan dengan persyaratan sesuai SNI 1726:2012 dan FEMA 356-2000.

Tabel 4. Rekapitulasi Evaluasi Bangunan Modular

Arah Gempa Periode Ulang	X	Y	XY
50 tahun	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi
100 tahun	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi
200 tahun	Memenuhi	Memenuhi	Kolaps
500 tahun	Memenuhi	Memenuhi	Kolaps
1000 tahun	Kolaps	Memenuhi	Kolaps
2500 tahun	Kolaps	Kolaps	Kolaps

6. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, struktur bangunan yang dibebani dengan gempa arah X *collapse* pada periode ulang 1000 dan 2500 tahun. Struktur yang dibebani dengan gempa arah Y *collapse* pada periode ulang 2500 tahun, sedangkan struktur dengan gempa dua arah sekaligus *collapse* di semua periode ulang kecuali 50 dan 100 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan struktur hanya cocok diaplikasikan untuk wilayah gempa dengan periode ulang yang kecil. Selain itu, struktur pada sumbu Y lebih kuat apabila dibandingkan dengan struktur pada sumbu X. Hal ini disebabkan karena

lebih banyak bresing yang ada pada sumbu Y struktur. Untuk penelitian berikutnya, dapat digunakan profil dengan ukuran lebih besar atau sambungan jenis lain untuk memberi perkuatan pada struktur. Permodelan sambungan dapat dilakukan secara mikro menggunakan *software* lain, atau dengan melakukan penelitian eksperimental.

7. DAFTAR REFERENSI

- Gann, D. M. (1996). "Construction as a Manufacturing Process? Similarities and Differences between Industrialized Housing and Car Production in Japan." *Construction Management & Economics*. Vol. 14, No. 5, 437-450.
- Gibb, A. G. (1999). *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*. John Wiley & Sons, New York.
- Gunawardena, T. (2016). *Behaviour of Prefabricated Modular Buildings Subjected to Lateral Loads*. Doctoral dissertation, University of Melbourne, Melbourne.
- Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. & Bi, K. (2018). "Structural Response of Modular Buildings – An Overview." *Journal of Building Engineering*. Vol. 16, 45–56. doi:10.1016/j.job.2017.12.008
- Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H., Bi, K. (2019). "Review of Bolted Inter-module Connections in Modular Steel Buildings." *Journal of Building Engineering*. Vol. 23, 207–219. doi:10.1016/j.job.2019.01.035
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Bergin, R. (2011). "Application of Modular Construction in High-rise Buildings." *Journal of architectural engineering*. Vol. 18, No. 2, 148-154.
- Lumantarna, B., Gunawan, I., & Wijaya, E. (2004). "Keandalan Analisa Pushover untuk Meramal Prilaku Seismik Nonlinier Struktur Portal Terbuka dengan Reentrant Corner." *Civil Engineering Dimension*. Vol. 6, No. 1, 1-6.
- Navaratnam, S., Ngo, T., Gunawardena, T., & Henderson, D. (2019). "Performance Review of Prefabricated Building Systems and Future Research in Australia." *Buildings*. Vol. 9, No. 2, 38.
- Sari, A. R., Handayani, H. H., & Agustan, A. (2014). "Penerapan Metode Dinsar untuk Analisa Deformasi akibat Gempa Bumi dengan Validasi Data GPS Sugar (Studi Kasus: Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat)." *Geoid*. Vol 10, No. 1, 26-31.
- Shigley, J. E., & Shigley. (1976). *Applied Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, New York.
- Siregar, Y. A. (2010). *Efek Dinding Pengisi Bata pada Respons Gempa Struktur Beton Bertulang*. Thesis, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Staib, Dörrhöfer, and Rosenthal. (2008). *Modular Construction Design and Structure New Technologies*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG München, Munich.
- Sultana, P., & Youssef, M. A. (2018). "Seismic Performance of Modular Steel-Braced Frames Utilizing Superelastic Shape Memory Alloy Bolts in the Vertical Module Connections." *Journal of Earthquake Engineering*, 1-25.
- VanGaasbeek C. J. (2011). *Numerical Modeling of Bolted Joints. An Applied Finite Element Analysis Approach*. Masters Thesis, Polytechnic Institute, Connecticut, USA.