

Evaluasi Nilai Faktor Performa Struktur Modular Komposit dengan Dinding Internal Pelat Baja Bergelombang

Patria Kusumaningrum*

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email : patria.k@itb.ac.id

Pramudya Tri Nanda

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email : trinanda.pramudya@gmail.com

Abstrak

Struktur modular merupakan struktur yang terdiri dari modul-modul penyusun yang diprefabrikasi di pabrik dan dirakit di lokasi konstruksi secara efektif dapat mengurangi durasi konstruksi, meningkatkan kualitas pengerjaan dan optimasi sumber daya. Penggunaan struktur modular komposit dapat menjadi solusi dari keterbatasan terhadap struktur modular baja dan struktur modular beton. Tetapi pemanfaatan struktur modular masih terbatas karena belum tercantum di dalam peraturan desain nasional, dan kurangnya pengetahuan akan karakteristik dan respon struktur modular terhadap beban gempa. Dua konfigurasi struktur modular komposit yaitu struktur modular komposit open frame dan struktur modular komposit infilled wall dikaji dalam penelitian ini. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku seismik konfigurasi struktur modular komposit yang telah disebutkan di atas. Faktor performa struktur (daktilitas, faktor kuat lebih, dan faktor modifikasi respon), parameter kinerja seismik struktur dan pola keruntuhan berdasarkan hirarki pembentukan sendi plastis dengan analisis nonlinear statik pushover dikaji dalam penelitian ini untuk meninjau respon struktur secara global.

Kata-kata Kunci: Struktur modular komposit, open frame, infilled wall, analisis nonlinear statik pushover, kurva kapasitas, faktor performa, daktilitas, kuat lebih, faktor modifikasi respons, kinerja seismik dan pola keruntuhan.

Abstract

Modular structure is a structure comprising of prefabricated modules manufactured in the factory and assembled on the construction site which can be effectively reducing construction duration, improving workmanship quality and optimizing resources. Composite modular structure may be one of solution to eliminate limitation arise from steel modular and concrete modular structures. However, the use of modular structures is limited because no design codes are available, and the lack of knowledge of the characteristics and response of modular structures subjected to earthquake. Two configurations of the composite modular structure, namely the open frame and the infilled wall composite modular structures are studied. This study aims to evaluate the seismic behavior of the above-mentioned composite modular structure configurations. Structural performance factors (ductility, overstrength factor, and response modification factor), structural seismic performance parameters and failure patterns based on the plastic hinge formation hierarchy with nonlinear static pushover analysis were studied in this study to review the structural response globally.

Keywords: Composite modular structure, open frame, infilled wall, nonlinear static pushover analysis, capacity curve, performance factor, hinge failure pattern.

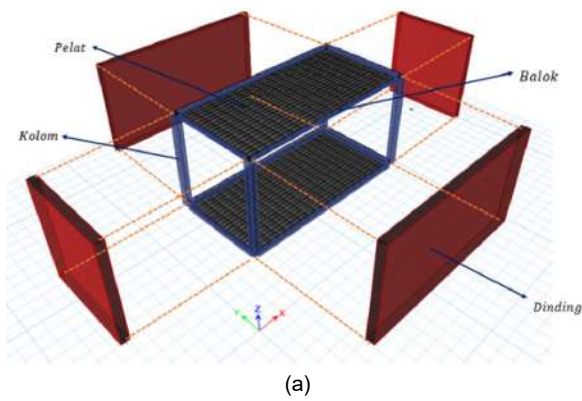
1. Pendahuluan

Struktur modular merupakan struktur yang terdiri dari modul-modul penyusun yang diprefabrikasi di pabrik dan dirakit di lokasi konstruksi secara efektif dapat mengurangi durasi konstruksi, meningkatkan kualitas pengerjaan dan optimasi sumber daya. Penggunaan struktur modular telah banyak diadopsi di berbagai sektor industri seperti residensial, hotel dan rumah sakit [Lawson dkk (2014) dan Deng dkk (2018)]. **Gambar 1** merupakan ilustrasi elemen struktur modular dan

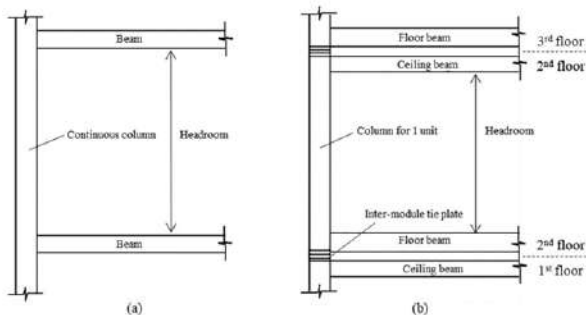
penerapan bangunan dengan struktur modular. Tidak seperti gedung konvensional, struktur gedung modular memiliki keterbatasan yaitu kemungkinan adanya gap tambahan dan pengurangan tinggi bersih ruangan akibat dari adanya komponen elemen atap dan elemen lantai dalam satu elevasi sehingga meningkatkan tinggi perlu lantai. Ilustrasi ini dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Tabel 1 menunjukkan konstruksi struktur gedung modular di dunia termasuk Indonesia beserta dengan sistem struktur yang digunakan. Pada **Tabel 1** dilihat

*Penulis Korespondensi: patria.k@itb.ac.id



Gambar 1. (a) Elemen struktur modular (b) Bangunan struktur modular



Gambar 2. Perbandingan headroom (a) Struktur gedung konvensional (b) Struktur gedung modular (Liew dkk (2019))

juga bahwa struktur modular baja dan struktur modular beton dominan digunakan sedangkan penggunaan struktur modular komposit masih sangat sedikit, padahal terdapat beberapa keuntungan dengan penggunaan struktur modular komposit, yaitu : (1) penggunaan struktur modular komposit dengan *lightweight concrete* dapat menurunkan berat modul hingga 40% [Liew dkk (2019)], (2) keterbatasan struktur gedung modular dapat diatasi dengan penggunaan penampang balok komposit yang dapat meningkatkan *headroom* hingga 30% dibandingkan penampang balok non komposit [Nandasky dkk (2017) dan Lam dkk (2015)] dan (3) kondisi struktur gedung tingkat tinggi struktur modular baja membutuhkan penampang kolom dengan ukuran dan ketebalan yang

lebih besar [Fransworth dkk (2014)], sehingga dapat mengurangi biaya dan mengurangi luas ruangan yang digunakan, oleh karena itu penggunaan kolom komposit seperti *concrete filled steel tube* (CFST) dapat menjadi solusi permasalahan tersebut.

juga bahwa struktur modular baja dan struktur modular beton dominan digunakan sedangkan penggunaan struktur modular komposit masih sangat sedikit, padahal terdapat beberapa keuntungan dengan penggunaan struktur modular komposit, yaitu : (1) penggunaan struktur modular komposit dengan *lightweight concrete* dapat menurunkan berat modul hingga 40% [Liew dkk (2019)], (2) keterbatasan struktur gedung modular dapat diatasi dengan penggunaan penampang balok komposit yang dapat meningkatkan *headroom* hingga 30% dibandingkan penampang balok non komposit [Nandasky dkk (2017) dan Lam dkk (2015)] dan (3) kondisi struktur gedung tingkat tinggi struktur modular baja membutuhkan penampang kolom dengan ukuran dan ketebalan yang lebih besar [Fransworth dkk (2014)], sehingga dapat mengurangi biaya dan mengurangi luas ruangan yang digunakan, oleh karena itu penggunaan kolom komposit seperti *concrete filled steel tube* (CFST) dapat menjadi solusi permasalahan tersebut.

Penelitian struktur modular komposit telah dilakukan beberapa peneliti dunia antara lain Liew dkk (2019) dan Peng dkk (2021). Liew dkk (2019) membahas keunggulan dari penggunaan struktur modular

Tabel 1 Konstruksi struktur gedung modular di dunia

No	Proyek	Tahun	Lokasi	Tinggi Bangunan	Material dan Metode	Sistem Struktur
1	Modular Pit Building MotoGP Mandalika	2021	Indonesia	3 Lantai	Baja, 3D Volumetrik	Modular Rangka Baja
2	RS Modular Tanjung Duren	2021	Indonesia	1 Lantai	Baja, 3D Volumetrik	Modular Rangka Baja
3	Croydon Tower	2020	UK	44 Lantai (135.6 m)	Baja, 3D Volumetrik	Modular + In-situ Dinding Inti Beton
4	Collin House	2019	Australia	60 Lantai (184.0 m)	Beton, 2D Panel + 3D Volumetrik	Modular + In-situ Dinding Inti Beton
5	Clement Canopy	2019	Singapura	40 Lantai (129.5 m)	Beton, 3D Volumetrik	Modular + In-situ Dinding Inti Beton
6	Atira La Trobe	2018	Australia	44 Lantai (131.0 m)	Beton, 2D Panel + 3D Volumetrik	Modular + In-situ Dinding Geser dan Inti Beton
7	Apex House	2017	Singapura	29 Lantai	Baja, 3D Volumetrik	Hybrid Modular + In-situ Dinding Inti Beton
8	Atlantic Yard B2	2016	USA	32 Lantai (98.2 m)	Baja, 3D Volumetrik	Modular + Bresing + Hat Truss + Tunned Mass Damper
9	La Trobe Tower	2016	Australia	40 Lantai	Beton, 2D Panel + 3D Volumetrik	Modular + In-situ Dinding Geser dan Inti Beton
10	J57 Mini Sky City Tower	2015	China	57 Lantai	Baja, 2D Panel	Modular + In-situ Dinding Inti Beton
11	SOHO Tower	2014	Australia	29 Lantai	Baja, 3D Volumetrik	Modular + In-situ Dinding Inti Beton

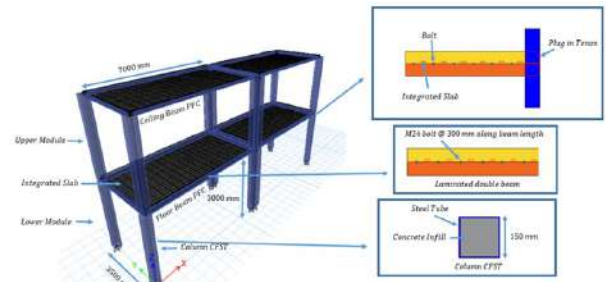
komposit dibandingkan struktur modular baja dan struktur modular beton. Literatur tersebut memberikan pencerahan terkait manfaat struktur modular komposit dan sambungan intermodul yang digunakan. Sementara itu, Peng dkk (2021) mengangkat konsep desain *corner supported steel concrete composite modular structure*. Kekuatan dan kekakuan individu modul ditingkatkan melalui penggunaan kolom *concrete filled steel tube* (CFST), *laminated double beams*, dan *integrated concrete slab*.

Integritas struktur modular komposit menggunakan sambungan intermodul *tenon connected* dan dikombinasikan dengan sambungan *beam to beam bolt*. Penggunaan *laminated double beam* berupa komposit balok atap-balok lantai yang diajukan oleh Peng dkk (2021) dapat mengurangi jarak vertikal antar modul dan meningkatkan tinggi bersih ruangan yang selama ini menjadi keterbatasan struktur modular. Penggunaan kolom *concrete filled steel tube* (CFST) dibuktikan dapat meningkatkan disipasi energi. Akan tetapi, dari hasil penelitian menunjukkan bahwa deformasi terlokalisasi di sambungan sementara balok tidak mengalami leleh. Oleh karena itu, pada penelitian ini tenon ditambahkan *insitu grouted joint* pada sambungan *tenon connected* agar memperkaku sambungan dan mencegah terjadinya plastisitas pada sambungan intermodul.

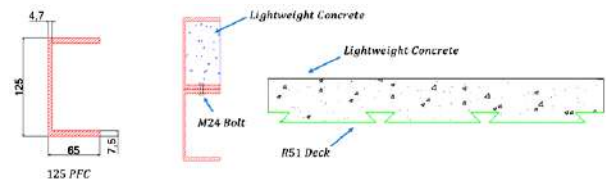
Studi ini dilakukan karena belum adanya regulasi mengenai desain struktur modular terhadap beban gempa pada SNI 1726 : 2019 dan keterbatasan literatur dalam negeri terkait struktur modular. Pengaruh dinding pada struktur modular komposit diperhitungkan untuk mendapat perilaku riil pada struktur modular. Studi ini mengkaji nilai faktor performa yaitu daktilitas, faktor kuat lebih dan faktor modifikasi respon pada 2 (dua) sistem struktur modular yaitu struktur modular komposit *open frame* dan struktur modular komposit *infilled wall*. Evaluasi kinerja struktur akibat beban seismik dikaitkan pada beberapa hal yaitu : (1) aspek kekuatan yang berdasarkan pada rasio kebutuhan-kapasitas penampang elemen struktur, (2) aspek kekakuan yang berdasarkan pada besaran simpangan antar lantai, dan (3) pola keruntuhan.

2. Metodologi

Spesifikasi material dan dimensi struktur modular komposit diambil berdasarkan spesifikasi Peng dkk (2021) yang telah mengajukan desain *corner supported composite module* diilustrasikan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Struktur modular komposit dengan tipe corner supported



Gambar 4. Integrasi balok dan pelat komposit

Kekuatan dan kekakuan individu modul ditingkatkan melalui penggunaan *concrete filled steel tube* (CFST), *laminated double beams* dan *integrated concrete slab*. *Concrete filled steel tube* merupakan jenis penampang *hollow* baja yang diisi oleh beton membentuk suatu aksi komposit antara material baja dan beton. *Laminated double beams* merupakan jenis penampang yang menggabungkan antara balok lantai dan balok atap dengan baut pada sepanjang balok yang bertujuan mengurangi gap antara balok atap dan balok lantai. *Integrated concrete slab* merupakan jenis pelat yang menggunakan pelat beton, deck dan juga dikombinasikan melalui aksi komposit dengan balok lantai yang diilustrasikan pada **Gambar 4**. Dinding internal yang digunakan pada struktur modular komposit ialah pelat baja bergelombang yang telah diverifikasi sebagai komponen penahan lateral yang dianalogikan sebagai *strut* dan *tie* [Ding dkk (2019) dan Deng dkk (2019)]. **Tabel 2** menunjukkan spesifikasi material serta dimensi struktur modular komposit pada studi ini.

Sistem sambungan intermodul yang digunakan ialah tipe sambungan *tenon connected intermodule* yang dikombinasikan oleh sambungan *beam to beam bolt*. Bagian *plug in* dibagi atas 3 (tiga) konfigurasi yaitu

Tabel 2. Spesifikasi material dan dimensi struktur modular komposit

Komponen Struktur	Dimensi	Material
Kolom	150 mm x 150 mm x 5 mm	Baja ($f_y= 350$ MPa, $f_u= 490$ MPa , $E= 200$ GPa) Beton Pengisi ($f_c' = 60$ Mpa, $E = 36406$ MPa)
Balok	PFC 125	Baja ($f_y=350$ Mpa, $f_u= 490$ Mpa, $E=200$ GPa)
Pelat	Profil Deck R51	Baja ($f_y= 350$ MPa, $f_u= 490$ MPa , $E= 200$ GPa) Beton Ringan ($f_c' = 27$ MPa, $E=24855$ Mpa)
Plug in	134 mm x 134 mm x 10 mm	Baja ($f_y= 350$ MPa, $f_u= 490$ Mpa, $E= 200$ GPa) Beton Pengisi ($f_c' = 60$ Mpa, $E = 36406$ MPa)
Baut	M24	Grade 8.8 ($f_y= 660$ MPa, $f_u= 830$ Mpa, $E= 200$ GPa)
Dinding Internal	CSPSW 100-47-10-20.5-2	Baja ($f_y=388$ MPa, $f_u= 432$ MPa, $E = 201$ GPa)
Module Dimension	7000 mm x 3500 mm x 3000 mm	

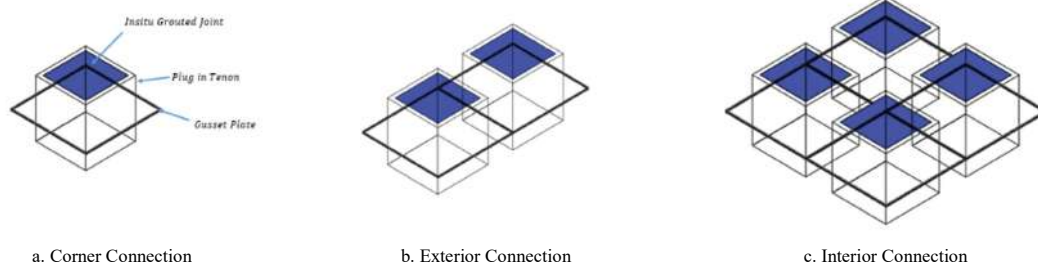
bagian sudut, interior dan eksterior yang diilustrasikan pada **Gambar 5**. Seluruh tenon memiliki dimensi panjang 150 mm, lebar 134 mm dan tebal 10 mm dengan gap 3 mm sebagai toleransi dalam pemasangan. Desain ukuran dan sambungan intermodul tenon didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Peng dkk (2021). Studi numerikal telah dilakukan oleh peneliti mengenai perilaku sambungan *tenon connected* [Chen dkk (2019) dan Peng dkk (2020)]. Berdasarkan hasil penelitian Peng dkk (2021) terdapat plastifikasi pada tenon, oleh karena itu pada penelitian ini tenon ditambahkan *insitu grouted joint* agar diharapkan tidak terjadi plastifikasi pada tenon. Sambungan intermodul terbagi atas sambungan vertikal dan sambungan horizontal. *Plug in tenon* bertanggung jawab untuk mentransfer gaya geser dan momen lentur antar kolom atas dan kolom bawah, *beam to beam bolts* bertanggung jawab untuk mentransfer gaya vertikal dan pengikat modul atas dan modul bawah, sedangkan *gusset plate* bertanggung jawab untuk mentransfer gaya horizontal dan pengikat antar modul berdekatan yang diilustrasikan pada **Gambar 6**.

Studi ini dilakukan untuk membandingkan pengaruh dinding internal pada penggunaan struktur modular komposit. Struktur modular komposit yang ditinjau ialah struktur modular komposit *open frame* dan struktur modular komposit *infilled wall*. Pada studi ini struktur modular tinjauan berlokasi di Jakarta dengan karakteristik tanah lunak. Konfigurasi struktur modular komposit *open frame* dan struktur modular komposit *infilled wall* diilustrasikan pada **Gambar 7**. Analisis struktur dilakukan dengan bantuan software ETABS 18 dan XTRACT digunakan untuk menganalisis perilaku nonlinear penampang elemen balok, kolom dan sambungan intermodul. Analisis linear respon spektra dilakukan untuk mendapatkan parameter rasio kebutuhan-kapasitas penampang dan simpangan antar lantai yang bersesuaian dengan SNI 1726 : 2019. Analisis pushover dilakukan untuk menganalisis kinerja struktur berupa faktor performa struktur yang terdiri dari daktilitas, faktor kuat lebih, dan faktor modifikasi respon serta mengamati pola keruntuhan struktur dari pembentukan sendi plastisnya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kajian faktor performa struktur modular komposit

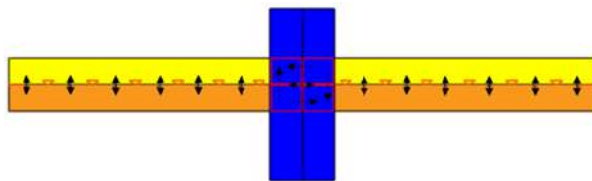
Struktur modular komposit belum masuk ke dalam kategori sistem struktur yang disyaratkan pada **Tabel 3**



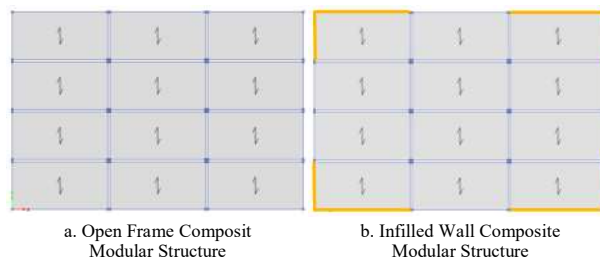
Gambar 5. Tipe sambungan plug in, (a) Sambungan sudut (b) Sambungan eksterior dan (c) Sambungan interior

SNI 1726 : 2019 mengenai nilai faktor modifikasi respon dan nilai faktor kuat lebih struktur. Nilai tersebut diperlukan untuk melihat perilaku daktail dari struktur modular, karena desain struktur yang baik terhadap gempa apabila nilai daktilitas struktur besar. Nilai faktor modifikasi respon dan nilai faktor kuat lebih struktur yang mungkin dapat digunakan ialah masing-masing sebesar 3 dengan mengkategorikan sistem struktur modular sebagai sistem struktur baja yang tidak didetailkan secara khusus untuk ketahanan seismik. Akan tetapi nilai ini perlu dievaluasi lagi untuk mencari nilai riil dari nilai faktor modifikasi respon dan nilai faktor kuat lebih struktur modular komposit. Faktor performa struktur merupakan faktor yang menggambarkan performa struktur yang meliputi faktor kuat lebih bangunan (R_Q), faktor daktilitas (R_{μ}), faktor redudansi (R_r) dan faktor redaman (R_{ξ}). Keempat nilai faktor ini akan digunakan untuk mendefinisikan nilai faktor modifikasi respon (R) yang digunakan sebagai nilai acuan untuk mereduksi gaya gempa desain pada struktur untuk mengizinkan struktur berperilaku inelastik. Faktor performa struktur modular komposit dikaji melalui kurva kapasitas hasil dari analisis statik nonlinear pushover.

Gambar 8 menunjukkan perbandingan kurva kapasitas antar struktur modular komposit *open frame* dan struktur modular komposit *infilled wall* 2 lantai dengan analisis pushover. Berdasarkan gaya geser dasar leleh



Gambar 6. Mekanisme transfer sambungan intermodul

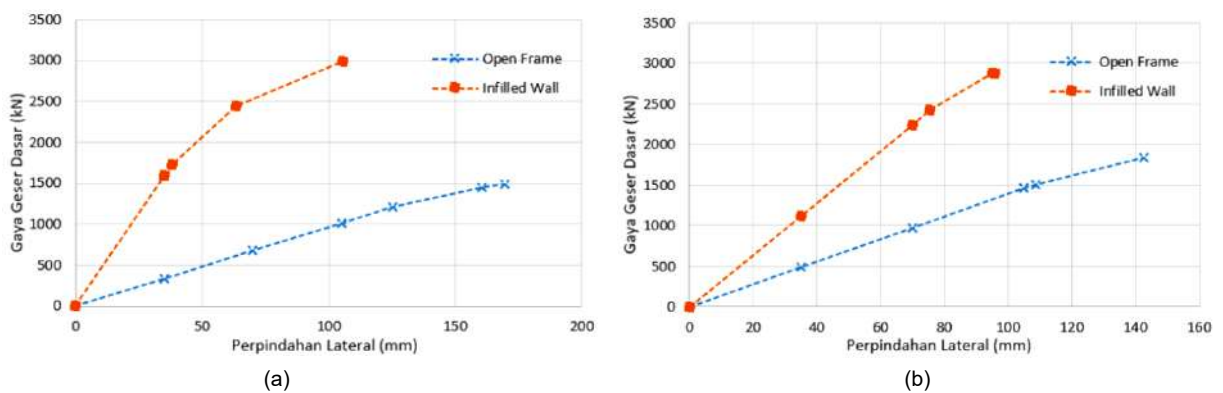


Gambar 7. Konfigurasi struktur modular komposit (a) Open frame, (b) Infilled frame

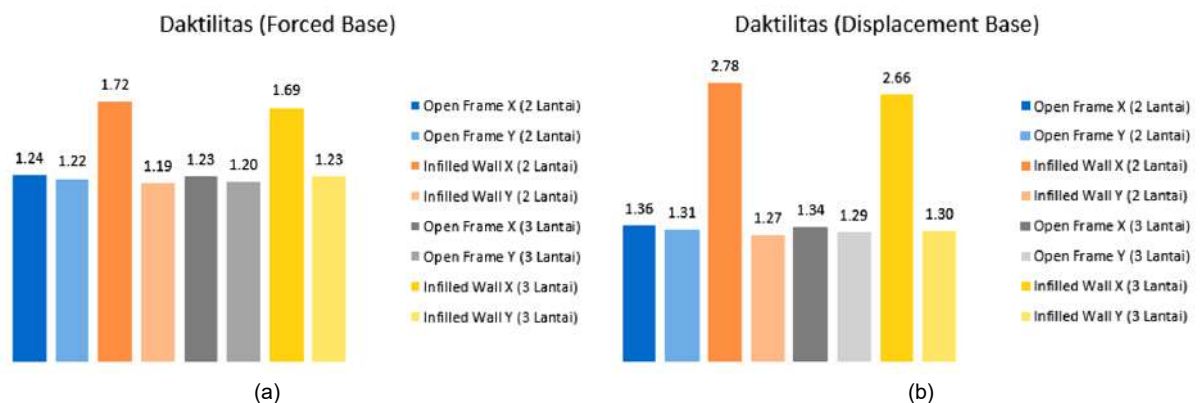
arah x, penambahan dinding internal meningkatkan gaya geser dasar leleh sebesar 43.8% (dari 1204 kN menjadi 1733 kN), sedangkan berdasarkan gaya geser dasar leleh arah y, penambahan dinding internal meningkatkan gaya geser dasar leleh sebesar 60.19% (dari 1509 kN menjadi 2418 kN). Berdasarkan gaya geser dasar ultimit arah x, penambahan dinding internal meningkatkan gaya geser dasar ultimit sebesar 100.77% (dari 1488 kN menjadi 2989 kN), sedangkan gaya geser dasar ultimit arah y, penambahan dinding internal meningkatkan gaya geser ultimit sebesar 56.65% (dari 1837 kN menjadi 2879 kN). Pengaruh dinding internal juga ditinjau berdasarkan perpindahan lateral pada struktur. Berdasarkan perpindahan leleh lateral arah x, penambahan dinding internal menurunkan perpindahan leleh lateral sebesar 69.6% (dari 125 mm menjadi 38 mm), sedangkan pada perpindahan leleh lateral arah y penambahan dinding internal menurunkan perpindahan leleh lateral sebesar 30.5% (dari 108 mm menjadi 75 mm). Berdasarkan perpindahan ultimit lateral arah x, penambahan dinding internal menurunkan perpindahan ultimit lateral sebesar 37.17% (dari 169 mm menjadi 105 mm), sedangkan perpindahan ultimit arah y, penambahan dinding internal menurunkan perpindahan ultimit lateral sebesar 32.83% (dari 142 mm menjadi 95 mm). Berdasarkan hasil yang didapat, pengaruh penambahan dinding internal pada struktur modular komposit secara umum meningkatkan kapasitas geser dasar leleh dan kapasitas geser dasar ultimit dan juga dengan penambahan dinding internal pada struktur modular komposit menurunkan perpindahan leleh lateral dan perpindahan ultimit lateral

akibat adanya peningkatan kekakuan pada struktur sehingga deformasi lateral pada struktur menjadi lebih kecil pada studi kasus struktur 2 lantai.

Daktilitas merupakan kemampuan struktur untuk berdeformasi setelah struktur melewati batas kapasitasnya. **Gambar 9** menunjukkan perbandingan nilai daktilitas struktur berdasarkan 2 (dua) pendekatan yaitu daktilitas berdasarkan gaya dan daktilitas berdasarkan perpindahan pada struktur modular komposit 2 lantai dan 3 lantai. Pada nilai daktilitas berdasarkan gaya, struktur modular komposit *open frame* memiliki nilai daktilitas dalam rentang (1.2-1.24) sedangkan struktur modular komposit *infilled wall* memiliki nilai daktilitas dalam rentang (1.19-1.72). Pada nilai daktilitas berdasarkan perpindahan, struktur modular komposit *open frame* memiliki nilai daktilitas dalam rentang (1.29-1.36) sedangkan struktur modular komposit *infilled wall* memiliki nilai daktilitas dalam rentang (1.27-2.78). Pada **Gambar 9** menunjukkan bahwa daktilitas struktur modular komposit *infilled wall* lebih besar dibandingkan dengan daktilitas struktur modular komposit *open frame*. Hal ini dibuktikan dari hasil yang didapat yaitu pada daktilitas berdasarkan gaya pada arah x, penambahan dinding internal pada struktur modular komposit meningkatkan daktilitas struktur sebesar 38 % (2 lantai) dan 37% (3 lantai) sedangkan daktilitas berdasarkan perpindahan pada arah x, penambahan dinding internal pada struktur modular komposit meningkatkan daktilitas struktur sebesar 104.4% (2 lantai) dan 98.5% (3 lantai).



Gambar 8. Kurva kapasitas struktur modular komposit 2 lantai (a) Arah X (b) Arah Y



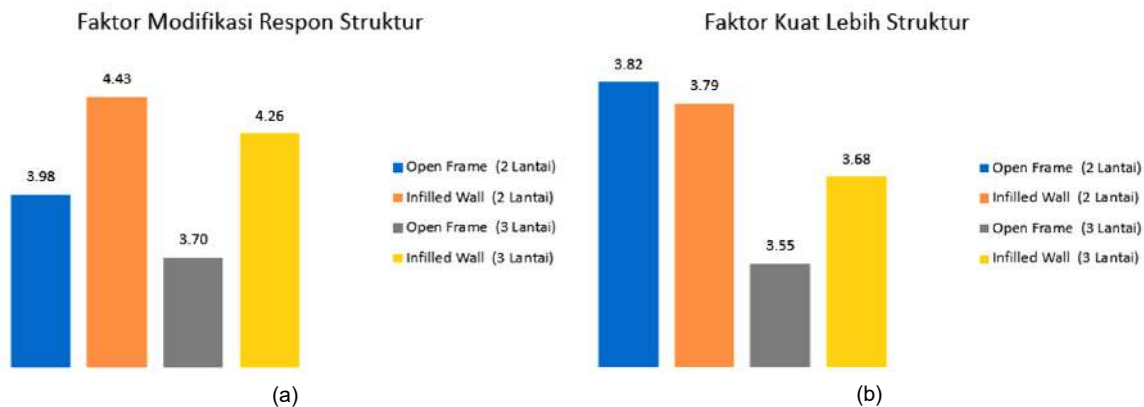
Gambar 9. Daktilitas struktur (a) Daktilitas berdasarkan gaya (b) Daktilitas berdasarkan perpindahan

Akan tetapi pada arah y, pengaruh penambahan dinding internal cenderung konstan dengan sedikit perubahan. Pada arah y, nilai daktilitas berdasarkan gaya dengan penambahan dinding internal pada struktur modular komposit mengalami perubahan sebesar 2.4% (2 lantai) dan 2.5% (3 lantai) sedangkan nilai daktilitas berdasarkan perpindahan dengan penambahan dinding internal pada struktur modular komposit mengalami perubahan sebesar 3.05% (2 lantai) dan 0.76% (3 lantai). Dibandingkan dengan perubahan nilai daktilitas pada arah x, perubahan nilai daktilitas pada arah y tidak signifikan atau dapat dikatakan tidak mengalami perubahan. Hal ini terjadi karena ketika struktur modular komposit *infilled wall* didorong pada arah x, keruntuhan terjadi pada dinding-dinding internal yang bersifat daktil sehingga struktur dapat berdeformasi lebih setelah struktur mencapai kapasitasnya sedangkan ketika struktur modular komposit *infilled wall* didorong pada arah y, keruntuhan terlokalisasi pada kolom-kolom dasar eksterior yang menyebabkan struktur tidak dapat berdeformasi lebih ketika sudah mencapai kapasitasnya.

Gambar 10 menunjukkan faktor performa struktur yang terdiri dari faktor modifikasi respon dan faktor kuat lebih struktur. Nilai faktor modifikasi respon digunakan sebagai parameter yang digunakan untuk mereduksi gaya gempa desain struktur untuk berperilaku inelastik. Nilai faktor kuat lebih struktur menunjukkan kapasitas lebih yang dimiliki struktur akibat adanya kuat lebih material, faktor keamanan, redundansi dan lain-lain untuk mencapai taraf kelelahan. Nilai ini juga dapat digunakan untuk mengamplifikasi gaya-gaya dari struktur atas ke

struktur bawah guna dalam merancang fondasi. Nilai faktor modifikasi respon struktur modular komposit *open frame* memiliki nilai rentang (3.7-3.98) sedangkan nilai faktor modifikasi respon struktur modular komposit *infilled wall* memiliki rentang nilai (4.26-4.43). Nilai faktor modifikasi respon yang didapat berada di dalam rentang kategori sistem rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa dan rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah.

Pada **Gambar 10 (a)** menunjukkan bahwa nilai faktor modifikasi respon struktur modular komposit *infilled wall* lebih besar dibandingkan dengan struktur modular komposit *open frame*. Penambahan dinding internal pada struktur modular komposit meningkatkan nilai faktor modifikasi respon sebesar 11.3% (2 lantai) dan 15.13% (3 lantai). Peningkatan nilai faktor modifikasi respon tersebut diakibatkan oleh adanya perpindahan distribusi dari balok menuju dinding-dinding yang memiliki perilaku yang lebih daktil. Akibat dari perilaku yang lebih daktil tersebut menyebabkan peningkatan nilai faktor respon modifikasi sebagai nilai reduksi gaya gempa dengan memanfaatkan daktilitas struktur. Pada **Gambar 10 (b)** nilai faktor kuat lebih struktur modular komposit *open frame* memiliki nilai rentang (3.55-3.82) sedangkan nilai faktor kuat lebih struktur modular komposit *infilled wall* memiliki nilai rentang (3.68-3.79). Pada struktur modular 2 lantai, penambahan dinding internal mengalami perubahan nilai faktor kuat lebih sebesar 0.78%. Perubahan yang terjadi pada struktur modular 2 lantai sangat kecil dan tidak terlalu signifikan. Pada struktur modular 3 lantai, penambahan dinding internal mengalami peningkatan nilai faktor kuat lebih sebesar 3.66%.



Gambar 10. Faktor performa struktur (a) Faktor modifikasi respon (b) Faktor kuat lebih struktur

Tabel 3. Perbandingan nilai R dan Ω_0 struktur modular komposit dengan sistem struktur pada SNI 1726 : 2019

Sistem Struktur	R	Ω_0
Rangka Baja dan Beton Komposit Pemikul Momen Khusus	8	3
Rangka Baja dan Beton Komposit Pemikul Momen Menengah	5	3
Rangka Baja dan Beton Komposit Pemikul Momen Biasa	3	3
Sistem Baja tidak didetailkan secara khusus untuk ketahanan seismik, tidak termasuk sistem kolom kantilever	3	3
Struktur Modular Baja Beton Komposit Open Frame (2 Lantai)	3,9	3,8
Struktur Modular Baja Beton Komposit Infilled Wall (2 Lantai)	4,4	3,8
Struktur Modular Baja Beton Komposit Open Frame (3 Lantai)	3,7	3,5
Struktur Modular Baja Beton Komposit dengan Infilled Wall (3 Lantai)	4,3	3,6

Pada struktur modular 3 lantai peningkatan kuat lebih struktur akibat penambahan dinding internal semakin signifikan dibandingkan dengan struktur modular 2 lantai. Peningkatan faktor kuat lebih struktur akibat penambahan dinding internal disebabkan karena adanya perpindahan distribusi sendi plastis dari balok menuju pada dinding-dinding yang memiliki nilai kuat lebih yang baik dibandingkan struktur modular komposit *open frame*.

Pengaruh penambahan lantai pada struktur modular komposit *open frame* dari 2 lantai menjadi 3 lantai mengalami penurunan nilai faktor modifikasi respon sebesar 7.56% sedangkan struktur modular komposit *infilled wall* mengalami penurunan nilai faktor modifikasi respon sebesar 3.99%. Penurunan nilai faktor modifikasi respon seiring peningkatan jumlah tingkat pada struktur modular terjadi karena penurunan nilai daktilitas pada struktur modular. Selain itu, pengaruh penambahan lantai pada struktur modular *open frame* dari 2 lantai menjadi 3 lantai mengalami penurunan nilai faktor kuat lebih struktur sebesar 7.6% sedangkan struktur modular komposit *infilled wall* mengalami penurunan nilai faktor kuat lebih struktur sebesar 2.96%. Penurunan nilai faktor kuat lebih struktur dengan peningkatan jumlah tingkat pada struktur modular terjadi karena adanya penurunan terhadap kapasitas lebih pada struktur untuk mencapai taraf kelelahan.

Tabel 10 menunjukkan perbandingan nilai faktor modifikasi respon dan nilai faktor kuat lebih struktur sistem struktur modular komposit dengan sistem struktur yang diatur pada SNI 1726 : 2019. Struktur modular komposit tidak memiliki nilai R pada rentang 5 hingga 8. Hal ini dikarenakan pada struktur modular komposit tidak terdapat pendetailan struktur sebagai objek pendisipasi energi gempa seperti sistem rangka pemikul momen yang terdapat bagian elemen struktur yang didetailkan untuk mendisipasi energi gempa sehingga struktur diharapkan berperilaku daktil. Sulitnya penerapan optimasi pada struktur karena ukuran elemen-elemen struktur sudah difabrikasi dengan ukuran yang tetap sehingga menjadi tantangan untuk meningkatkan daktilitas pada struktur. Pola kelelahan serentak pada struktur modular komposit juga memberikan gambaran adanya tingkat daktilitas yang rendah sehingga struktur kurang berperilaku daktil. Nilai faktor kuat lebih struktur modular komposit berada di rentang (3.5-3.8). Hasil ini lebih besar dibandingkan dengan nilai faktor

kuat lebih pada sistem struktur yang diatur pada SNI 1726 : 2019 sesuai pada **Tabel 3**. Hal ini terjadi karena adanya karakteristik dari sistem struktur modular yang memiliki konfigurasi *double beam* dan *double column* akibat adanya modul-modul yang terpisah sehingga terdapat banyak pola distribusi plastisitas pada elemen balok maupun kolom yang meningkatkan nilai faktor kuat lebih struktur.

3.2 Kajian kekuatan dan kekakuan struktur modular komposit

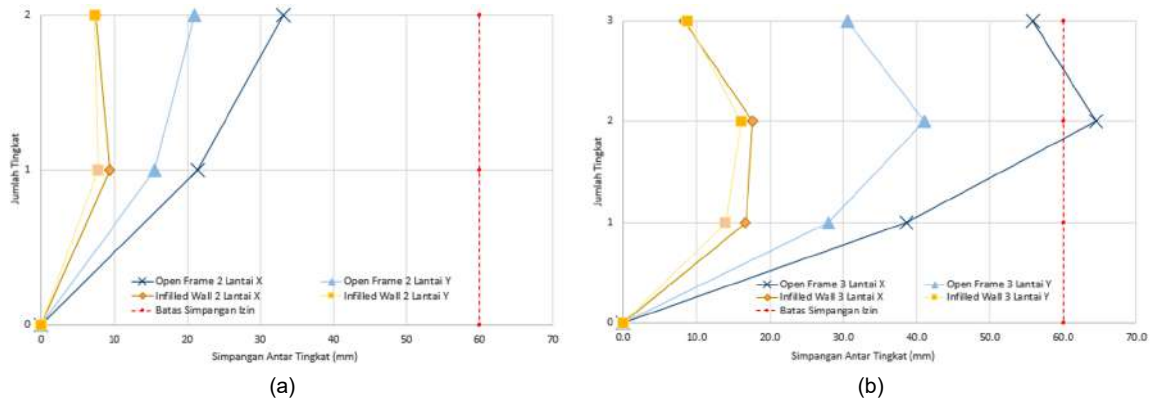
Pengaruh penambahan dinding internal pada struktur modular komposit berdasarkan kekuatan dan kekakuan pada 2 lantai dan 3 lantai dikaji dalam studi ini. Berdasarkan rasio kebutuhan-kapasitas aksial momen pada kolom, penambahan dinding internal pada struktur modular komposit menurunkan rasio kebutuhan-kapasitas aksial momen sebesar 24.73% (2 lantai) dan 33.68% (3 lantai) sedangkan berdasarkan rasio kebutuhan-kapasitas geser pada kolom, penambahan dinding internal pada struktur modular komposit menurunkan rasio kebutuhan-kapasitas geser sebesar 27.14% (2 lantai) dan 34.65% (3 lantai). Berdasarkan rasio kebutuhan-kapasitas momen pada balok, penambahan dinding internal pada struktur modular komposit menurunkan rasio kebutuhan-kapasitas geser pada balok, penambahan dinding internal pada struktur modular komposit menurunkan rasio kebutuhan-kapasitas geser sebesar 22.9% (2 lantai) dan 23.64% (3 lantai). Dari hasil yang didapat penambahan dinding internal pada struktur modular komposit secara umum menurunkan rasio kebutuhan-kapasitas elemen struktur. Hal ini terjadi karena dinding membantu struktur untuk memikul gaya seismik yang terjadi pada struktur, sehingga gaya dalam yang terjadi pada elemen balok dan elemen kolom mengalami penurunan. Penurunan rasio kebutuhan-kapasitas elemen struktur dimanfaatkan untuk dapat menambahkan jumlah tingkat struktur modular komposit. Hal ini dapat dilihat bahwa struktur modular komposit *open frame* 3 lantai mengalami kelebihan rasio kebutuhan-kapasitas elemen kolom dasar (rasio kebutuhan-kapasitas >1), sehingga struktur modular komposit *open frame* hanya dibatasi oleh 2 lantai, sedangkan dengan penambahan dinding internal rasio kebutuhan-kapasitas elemen kolom dasar

Tabel 4. Perbandingan rasio kebutuhan-kapasitas elemen struktur modular 2 lantai open frame dan infilled frame

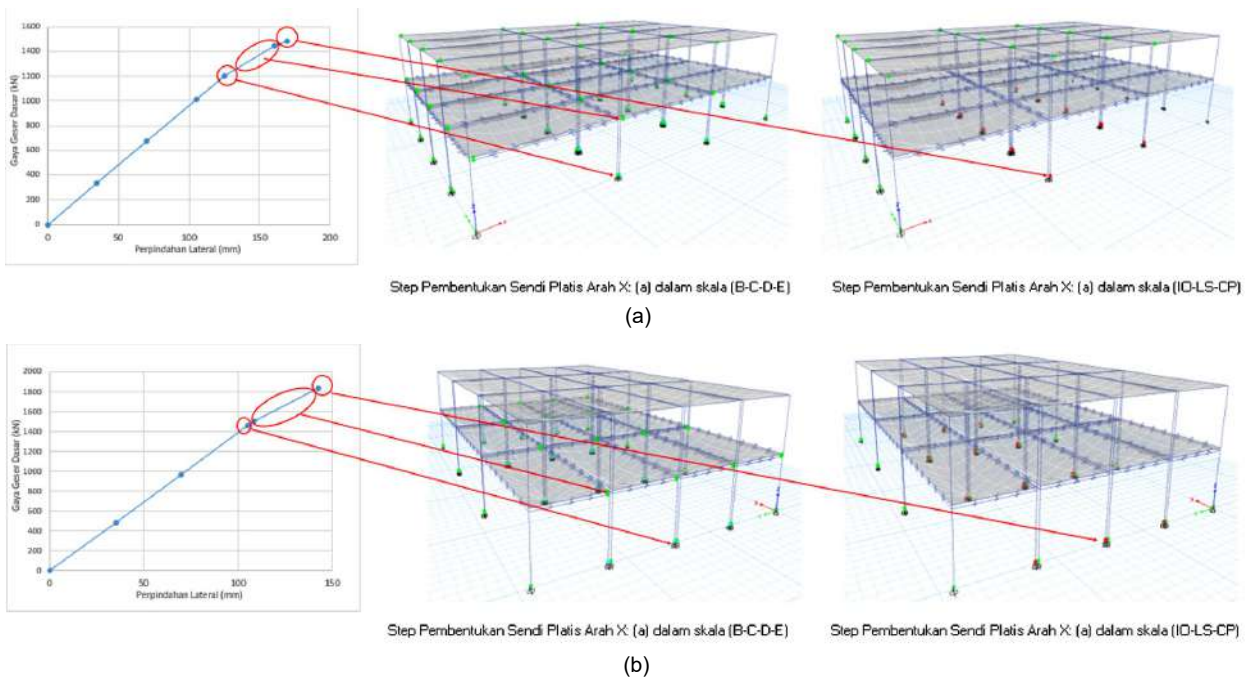
Gempa	Elemen	Gaya Dominan	Kombinasi Beban	Lantai	Sistem Struktur	
					Open Frame	Infilled Wall
Jakarta	Kolom	Aksial + Momen	(1.2 + 0.2 Sds) DL+(1.2+0.2 Sds) SIDL +LL- 1.3 Ey - 0.39 Ex	Base	0.752	0.566
		Geser	(0.9 - 0.2 Sds) DL + (0.9-0.2 Sds) SIDL + 1.3 Ey + 0.39 Ex	Base	0.07	0.051
	Balok	Momen Mayor	(1.2 + 0.2 Sds) DL+(1.2+0.2 Sds) SIDL +LL+ 1.3 Ey + 0.39 Ex	1	0.675	0.612
		Geser	(1.2 + 0.2 Sds) DL+(1.2+0.2 Sds) SIDL +LL+ 1.3 Ey + 0.39 Ex	1	0.174	0.134

Tabel 5. Perbandingan rasio kebutuhan-kapasitas elemen struktur modular 3 lantai open frame dan infilled frame

Gempa	Elemen	Gaya Dominan	Kombinasi Beban	Lantai	Sistem Struktur	
					Open Frame	Infilled Wall
Jakarta	Kolom	Aksial + Momen	(1.2 + 0.2 Sds) DL+(1.2+0.2 Sds) SIDL +LL- 1.3 Ey - 0.39 Ex	Base	1.134	0.752
		Geser	(0.9 - 0.2 Sds) DL + (0.9-0.2 Sds) SIDL + 1.3 Ey + 0.39 Ex	Base	0.101	0.066
	Balok	Momen Mayor	(1.2 + 0.2 Sds) DL+(1.2+0.2 Sds) SIDL +LL+ 1.3 Ey + 0.39 Ex	1	0.819	0.619
		Geser	(1.2 + 0.2 Sds) DL+(1.2+0.2 Sds) SIDL +LL+ 1.3 Ey + 0.39 Ex	1	0.183	0.148



Gambar 11. Simpangan antar tingkat (a) 2 lantai (b) 3 lantai



Gambar 12. Pola keruntuhan struktur modular komposit open frame 2 lantai (a) Arah x, (b) Arah y

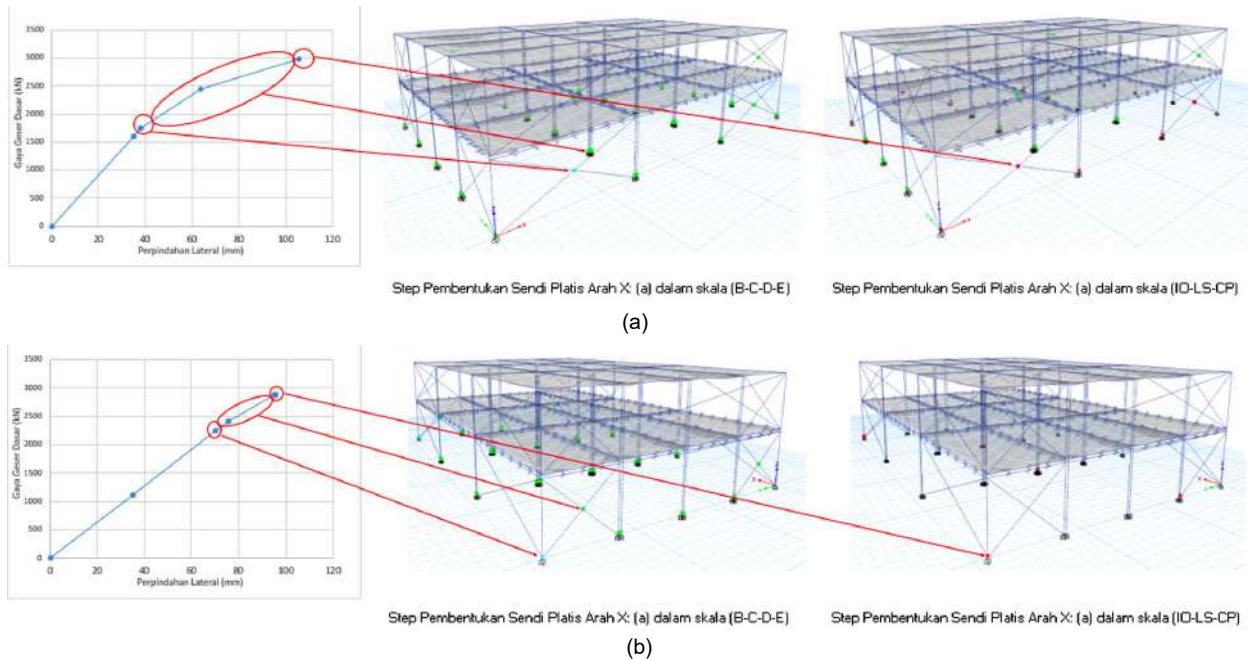
mengalami penurunan dan struktur modular komposit dapat ditingkatkan hingga 3 lantai.

Gambar 11 menunjukkan simpangan antar tingkat struktur modular komposit *open frame* dan struktur modular komposit *infilled wall*. Berdasarkan simpangan antar tingkat yang terjadi, pada struktur 2 lantai, penambahan dinding internal sebagai pengaku pada struktur modular komposit menurunkan simpangan antar tingkat maksimum struktur sebesar 77% (arah x) dan 65% (arah y). Pada struktur 3 lantai, penambahan dinding internal sebagai pengaku pada struktur modular komposit menurunkan simpangan antar tingkat maksimum struktur sebesar 72.69% (arah x) dan 60.84% (arah y). Dari hasil yang didapat secara umum penambahan dinding internal pada struktur modular komposit menurunkan besaran simpangan antar tingkat pada struktur akibat dari peningkatan kekakuan pada struktur modular komposit. Peningkatan kekakuan ini diakibatkan elemen dinding

yang memiliki kekakuan *in-plane* yang besar sehingga meningkatkan kekakuan struktur modular komposit yang cenderung fleksibel akibat dari komponen-komponen modul yang terpisah. Peningkatan kekakuan ini dimanfaatkan untuk meningkatkan jumlah lantai yang dapat ditambahkan pada struktur modular komposit, hal ini disebabkan karena simpangan antar tingkat yang terjadi pada struktur modular komposit *open frame* melebihi batas izin simpangan antar tingkat pada struktur, sehingga dengan penambahan dinding internal sebagai pengaku, struktur modular komposit dapat ditambah jumlahnya menjadi 3 lantai sedangkan pada struktur modular komposit *open frame* hanya dibatasi oleh 2 lantai.

3.3 Kajian pola keruntuhan struktur

Pengaruh dinding internal terhadap aspek pola keruntuhan pada struktur modular komposit dikaji dalam studi ini. Untuk mendapatkan pembentukan



Gambar 13. Pola keruntuhan struktur modular komposit infilled wall 2 lantai (a) Arah x, (b) Arah y

sendi plastis pada struktur, dilakukan analisis nonlinear statik pushover pada struktur hingga struktur mengalami keruntuhan. Gambar 12 menunjukkan pola keruntuhan struktur modular komposit *open frame* pada masing-masing arah. Pada masing-masing arah, struktur modular komposit *open frame* mulai terjadi kelelahan pada kolom-kolom dasar struktur, selanjutnya kelelahan mulai terjadi pada balok-balok di lantai 1 (satu) hingga lantai 2 (dua). Kelelahan yang terjadi pada kolom-kolom dasar dan balok-balok terus berkembang hingga terjadi keruntuhan pada kolom-kolom dasar. Gambar 13 menunjukkan pengaruh dinding internal terhadap pola keruntuhan struktur modular komposit. Pada arah x, struktur modular komposit *infilled wall* mulai terjadi kelelahan pada dinding-dinding internal, selanjutnya kelelahan mulai terjadi pada kolom-kolom dasar. Kelelahan yang terjadi pada dinding-dinding internal dan kolom-kolom dasar terus berkembang hingga pada akhirnya terjadi keruntuhan pada dinding-dinding internal dan kolom-kolom dasar. Pada arah y, struktur modular komposit *infilled wall* mulai terjadi kelelahan pada kolom-kolom sudut dasar, selanjutnya kelelahan mulai terjadi pada dinding-dinding internal. Kelelahan yang terjadi pada kolom-kolom dasar dan dinding-dinding internal tersebut berkembang hingga terjadi keruntuhan pada kolom-kolom sudut dasar. Pada kondisi ini tidak terjadi kelelahan pada balok-balok. Perbedaan pola keruntuhan pada arah x dan arah y dengan penambahan dinding internal menyebabkan perbedaan nilai daktilitas. Pada arah x kerusakan terjadi pada dinding-dinding sedangkan arah y kerusakan terjadi pada kolom dasar. Perbedaan pola keruntuhan ini menyebabkan nilai daktilitas pada arah x lebih besar dibandingkan pada arah y. Dari hasil yang didapatkan secara umum penambahan dinding internal pada struktur modular komposit memindahkan kelelahan yang terjadi pada balok-balok menjadi kelelahan pada dinding-dinding sehingga struktur berperilaku daktil.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi struktur modular komposit tinjauan, kesimpulan yang dapat ditarik adalah sebagai berikut:

1. Faktor performa struktur modular komposit open frame dan struktur modular komposit infilled wall dengan jumlah lantai sebesar 2 lantai dan 3 lantai dianalisis dengan nonlinear statik pushover. untuk mendapatkan nilai daktilitas, faktor modifikasi respon dan faktor kuat lebih struktur.

a. Daktilitas Struktur Modular

Berdasarkan gaya, nilai daktilitas struktur modular komposit *open frame* ialah 1.2-1.24 dan struktur modular komposit *infilled wall* ialah 1.19-1.71. Berdasarkan perpindahan, nilai daktilitas struktur modular komposit *open frame* ialah (1.29-1.36) dan struktur modular komposit *infilled wall* ialah (1.27-2.78). Perilaku penambahan dinding pada arah x dan arah y terhadap daktilitas berbeda. Pada arah x, penambahan dinding internal meningkatkan daktilitas sebesar 38% (2 lantai), 37% (3 lantai) berdasarkan gaya, dan 104.4% (2 lantai), 98.5% (3 lantai) berdasarkan perpindahan. Pada arah y, penambahan dinding internal meningkatkan daktilitas sebesar 2.4% (2 lantai), 2.5% (3 lantai) berdasarkan gaya dan 3.05% (2 lantai), 0.76% berdasarkan perpindahan. Perbedaan ini terjadi karena pada arah x, keruntuhan terjadi pada dinding-dinding internal yang bersifat daktil sehingga struktur dapat berdeformasi lebih setelah struktur mencapai kapasitasnya sedangkan pada arah y, keruntuhan terlokalisasi pada kolom-kolom dasar eksterior yang menyebabkan struktur tidak dapat berdeformasi lebih ketika sudah mencapai

kapasitasnya sehingga berperilaku kurang daktail.

b. Faktor Modifikasi Respon

Nilai faktor modifikasi respon struktur modular komposit *open frame* ialah (3.7-3.98) dan struktur modular komposit *infilled wall* ialah (4.26-4.43). Penambahan dinding internal pada struktur modular komposit meningkatkan nilai faktor modifikasi respon sebesar 11.3% (2 lantai) dan 15.13% (3 lantai). Peningkatan nilai faktor modifikasi respon tersebut diakibatkan perpindahan distribusi sendi plastis dari balok menuju dinding yang bersifat daktail, sehingga dengan peningkatan daktilitas tersebut meningkatkan nilai faktor modifikasi respon struktur. Pengaruh penambahan lantai pada struktur modular komposit *open frame* (2 lantai-3 lantai) mengalami penurunan nilai faktor modifikasi respon sebesar 7.56% sedangkan struktur modular komposit *infilled wall* mengalami penurunan nilai faktor modifikasi respon sebesar 3.99%. Hal ini terjadi karena adanya penurunan daktilitas akibat penambahan lantai pada struktur.

c. Faktor kuat lebih struktur

Nilai faktor kuat lebih struktur modular komposit *open frame* ialah (3.55-3.82) dan struktur modular komposit *infilled wall* ialah (3.68-3.79). Nilai tersebut lebih besar dari 3 karena adanya pengaruh *double beam* dan *double column* pada struktur sehingga meningkatkan kuat lebih pada struktur. Pengaruh penambahan lantai pada struktur modular komposit *open frame* (2 lantai-3 lantai) mengalami penurunan nilai faktor kuat lebih sebesar 7.6% sedangkan struktur modular komposit *infilled wall* mengalami penurunan nilai faktor kuat lebih sebesar 2.96%. Hal ini terjadi karena adanya penurunan kapasitas lebih pada struktur untuk mencapai taraf kelelahan.

2. Pengaruh penambahan dinding internal pada struktur modular komposit terhadap aspek kekuatan dan kekakuan dapat disimpulkan sebagai berikut :

a. Aspek Kekuatan

Penambahan dinding internal pada struktur modular komposit menurunkan rasio kebutuhan-kapasitas kolom pada aksial momen sebesar 24.73% (2 lantai), 33.68% (3 lantai), dan geser sebesar 27.14% (2 lantai) dan 34.65% (3 lantai), sedangkan pada balok menurunkan rasio kebutuhan-kapasitas momen sebesar 10.29% (2 lantai), 24.4% (3 lantai) dan geser sebesar 22.9% (2 lantai), 23.64% (3 lantai). Penurunan ini terjadi karena dinding membantu struktur untuk memikul gaya seismik yang terjadi pada struktur, sehingga gaya dalam yang terjadi pada pada elemen balok dan elemen kolom mengalami penurunan. Penurunan rasio kebutuhan-kapasitas elemen struktur dimanfaatkan untuk menambahkan jumlah tingkat struktur modular komposit. Hal ini dapat dilihat bahwa struktur modular komposit *open frame* 3 lantai

mengalami kelebihan rasio kebutuhan-kapasitas elemen kolom dasar (rasio kebutuhan-kapasitas >1), sehingga struktur modular komposit *open frame* hanya dibatasi oleh 2 lantai, sedangkan dengan penambahan dinding internal rasio kebutuhan-kapasitas elemen kolom dasar mengalami penurunan sehingga dengan penambahan dinding internal struktur modular komposit dapat ditingkatkan hingga 3 lantai.

b. Aspek Kekakuan

Penambahan dinding internal sebagai pengaku pada struktur modular komposit menurunkan simpangan antar tingkat maksimum struktur 2 lantai sebesar 77% (arah x), 65% (arah y) dan pada struktur 3 lantai sebesar 72.69% (arah x) dan 60.84% (arah y). Penurunan ini akibat dari peningkatan kekakuan dinding yang memiliki kekakuan *in-plane* yang besar sehingga meningkatkan kekakuan struktur modular komposit yang cenderung fleksibel akibat dari komponen-komponen modul yang terpisah. Peningkatan kekakuan ini dimanfaatkan untuk meningkatkan jumlah lantai yang dapat ditambahkan pada struktur modular komposit, hal ini disebabkan karena simpangan antar tingkat yang terjadi pada struktur modular komposit *open frame* melebihi batas izin simpangan antar tingkat pada struktur, sehingga dengan penambahan dinding internal sebagai pengaku, struktur modular komposit dapat ditambah jumlah lantainya menjadi 3 lantai sedangkan pada struktur modular komposit *open frame* hanya dibatasi oleh 2 lantai.

c. Pola Keruntuhan

Penambahan dinding internal pada struktur modular komposit memindahkan kelelahan yang terjadi pada balok-balok menjadi kelelahan pada dinding-dinding sehingga struktur modular komposit berperilaku lebih daktail.

Daftar Pustaka

- Chen, Y., Hou, C., Peng, J., 2019, *Stability Study on Tenon-Connected SHS and CFST Columns in Modular Construction*, Steel and Composite Structures, Research Gate, Vol. 30.
- Deng, E.F., Zong, L., Ding, Y., Dai, X.M., 2018, *Monotonic and Cyclic Response of Bolted Connections with Welded Cover Plate for Modular Steel Construction*, Engineering Structures, Elsevier, Vol. 167, 407-419.
- Deng, E.F., Zong, L., Ding, Y., 2019, *Numerical and Analysis Study on Initial Stiffness of Corrugated Steel Plate Shear Walls in Modular Construction*, Steel and Composite Structures, Research Gate, Vol. 32, 347-359.
- Ding, Y., Deng, E.F., Zong, L., dkk, 2017, *Cyclic Tests on Corrugated Steel Plate Shear Walls with Openings in Modularized Constructions*,

Journal of Constructional Steel Research,
Elsevier, Vol. 138, 675-691.

- Fansworth, D., Principal, A., 2014, *Modular Tall Building Design at Atlantic Yards B2*, Proceeding of CTBUH 2014 International Conference, Shanghai, China.
- Fayed, M.N, 2018, *Evaluation Response Modification Factor of Multistory Buildings Designed According to Egyptian Code*, Journal of Mechanical and Civil Engineering, IOSR, Vol. 15, 66-86.
- Han, L., Yao, G., Tao, Z., 2007, *Performance of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Tubes Under Pure Torsion*, Thin-Walled Structures, Vol. 45, 24-36.
- Lam, D., Dai, X., Kuhlmann, U., Raichle, J., Braun, M., 2015, *Slim Floor Construction-Design fo Ultimate Limit State*, Steel Construction, Erns & Sohn, Vol. 8, 79-84.
- Lawson, R.M., Ogden, R.G., Goodier, C., 2014, *Design in Modular Construction*, CRC Press.
- Liew, J.Y.R, Chua, Y.S.,, Dai, Z., 2019, *Steel Concrete Composite Systems fo Modular Construction of High Rise Building*, Structures, Elsevier, Vol. 21, 135-149.
- Nadasky, P., 2012, *Steel-Concrete Composite Beams for Slim Floors-Specific Design Features in Scope of Steel Frames Design*, Procedia Engineering, Elsevier, Vol. 40, 274-279.
- Patel, V.I., Hassanein, M.F., Thai, H., Al Abadi, H., Elchalakani, M., Bai, Y., 2019, *Ultra High Strength Circular Short CFST Columns : Asymmetric Analysis, Behaviour and Design*, Engineering Structures, Research Gate, Vol. 179, 268-283.
- Peng, J., Hou, C., Shen, L., 2020, *Numerical Simulation of Weld Fracture Using Cohesive Interface for Novel Inter-module Connections*, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol. 174.
- Peng, J., Hou, C., Shen, L., 2021, *Lateral Resistance of Multi-Story Modular Buildings Using Tenon-Connected Intermodules Connections*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 177.
- Peng, J., Hou, C., Shen, L., 2021, *Numerical Analysis of Corner-Supported Composite Modular Buildings Under Wind Actions*, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol. 187.

