

STUDI FISIBILITAS DAN PENGARUH KEKAKUAN SAMBUNGAN ANTAR-MODUL TERHADAP KINERJA BANGUNAN MODULAR BERBASIS RANGKA BAJA DI INDONESIA

Muhammad Ilham Widiyantoko¹, Andreas Edward²

^{1,2} Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No.10, Kota Bandung, Jawa Barat 40132 Indonesia
*Email: widiyantoko@students.itb.ac.id

Abstrak

Keuntungan aspek produktivitas, kualitas dan keberlanjutan dari konstruksi berbasis modular dapat menjadi alternatif untuk menyeimbangkan upaya pemerataan infrastruktur di Indonesia. Meski demikian, keterbatasan pengetahuan mengenai karakteristik dan sifat bangunan modular menjadi tantangan utama dalam mengimplementasikan teknologi ini secara konvensional. Penelitian ini diusulkan untuk membahas fisibilitas penggunaan sambungan antar-modul. Studi parametrik yang dilakukan dengan mengiterasikan klasifikasi kinerja sambungan bertujuan untuk mengetahui pengaruh sistem stabilitas terhadap respon global dan menguji kompatibilitas inovasi struktur modular terhadap aturan desain Indonesia. Analisis secara linear dan non-linear berturut-turut ditinjau melalui Response Spectrum Analysis, dan Nonlinear Pushover Analysis. Performa dari masing-masing sistem didekati dari 3 parameter kinerja struktur yaitu; kekuatan (rasio kebutuhan-kapasitas elemen), kekakuan (stabilitas dan respon global bangunan), dan pola keruntuhan (hirarki pembentukan sendi plastis). Analisis dari aspek manajemen rekayasa konstruksi didekati dari fisibilitas penggunaan sambungan antar-modul pada bangunan berbasis modular yang hendak diterapkan di Indonesia. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi studi awal (preliminary-study) dalam pengembangan standar desain bangunan modular.

Kata kunci: baja, berkelanjutan, konstruksi, modular, sambungan antar-modul

1. PENDAHULUAN

Ditengah upaya pemerataan infrastruktur di Indonesia, proyek pengembangan prasarana dan permintaan akan gedung bertingkat terus bertambah. Pemenuhan akan peningkatan kebutuhan ini dapat mengikuti prinsip-prinsip kesederhanaan, standarisasi, dan pengulangan, yang membuat bangunan bertingkat tinggi secara inheren berkonsep modular [Liew, 2019]. Negara seperti Amerika Serikat dan Australia, sudah mulai mengembangkan dan mempromosikan penelitian yang hendak memberikan pemahaman dan pengetahuan baru mengenai bangunan tinggi berbasis modular [Lawson, 2012]. Sektor konstruksi China juga sudah mengambil bagian dari tren ini dengan terbangunnya sejumlah bangunan tinggi hasil hibridisasi antara konstruksi in-situ dan modular [Chen, 2019]. Meski demikian, sifat dan karakteristik dari bangunan tinggi berbasis modular masih perlu diteliti lebih lanjut.

Perbedaan mendasar antara konstruksi berbasis modular dengan konstruksi konvensional berada pada titik sambungan struktur yang bertambah secara signifikan. Sesuai dengan penelitian sebelumnya [Gunawardena dkk., 2016; Chua dkk., 2019; Sanches dkk., 2021], pengaruh kekakuan sambungan modul dan interaksi modul terhadap sistem penahan lateral eksternal menjadi parameter kritis dalam menentukan sifat dan karakteristik dari bangunan berbasis modular.

Sambungan antar-modul atau *inter-module connection* berfungsi untuk meneruskan beban dari suatu modul ke modul lainnya hingga pondasi. Sambungan berperan penting pada stabilitas dan integritas struktur berbasis modular, dimana banyaknya inovasi sambungan antar-modul tercerminkan pada Tabel 1. Apabila mengacu pada Eurocode 1993-1-8, sambungan dapat diklasifikasikan menjadi 3 yakni kaku, semi-kaku, dan sendi. Dalam kaitannya dengan konstruksi berbasis modular, Tabel 1 memperlihatkan bahwa terdapat beberapa variasi sambungan antar-modul yang dapat diklasifikasikan dari atribut dan performa struktural. Meski sambungan kaku sangat diharapkan dalam inovasi ini, sambungan kaku masih sulit untuk didapatkan untuk bangunan berbasis modular. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan dimensi dan ruang antar modul serta aspek produktivitas yang perlu diperhatikan.

Studi ini bertujuan untuk membahas fisibilitas *modular-based high rise building* sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Indonesia. Analisa secara komprehensif membahas mengenai pengaruh kekakuan sambungan antar modul terhadap respon global dan lokal struktur. Evaluasi mengenai kinerja bangunan berbasis modular terhadap beban seismik dibahas sesuai dengan 3 parameter integritas struktur yaitu; kekuatan, kekakuan, dan kestabilan.

Bagian akhir studi ini hendak membahas studi fisibilitas penggunaan berbagai jenis sambungan terhadap aspek struktural dan aspek metode pelaksanaan konstruksi. Penilaian dilakukan berdasarkan parameter kinerja sambungan yang disesuaikan dengan kondisi dan tantangan yang ada di Indonesia.

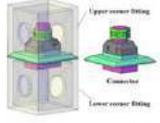
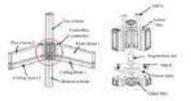
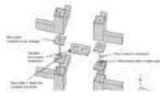
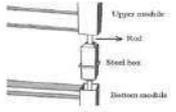
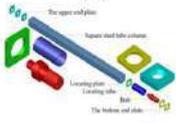
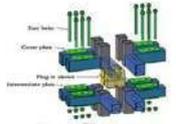
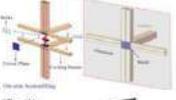
2. METODOLOGI

Studi akan terbagi menjadi dua bagian yakni tinjauan terhadap aspek struktural dan aspek manajemen konstruksi. Objek penelitian ialah struktur modular rangka baja dengan variasi kekakuan rotasi sambungan (terdiri atas sambungan sendi, semi-kaku, dan kaku) dan sistem penahan lateral yang berbeda (pemikul momen/tanpa pengaku, berpengaku, dinding geser). Analisis struktur dilaksanakan melalui pemodelan menggunakan *software* ETABS 19.

Analisis linear respon spektra dilakukan untuk meninjau parameter *demand-capacity ratio*, simpangan antar lantai dan efek P-delta, beserta parameter lain yang disyaratkan pada SNI terkait. Analisis dilanjutkan dengan analisis *pushover* untuk meninjau kinerja struktur yang meliputi pola keruntuhan struktur, yang berupa pembentukan sendi plastis, nilai daktilitas dan faktor kuat lebih struktur.

Penelitian diawali dengan meninjau struktur tanpa pengaku dengan sambungan semi-kaku yang diberi pembebanan sesuai dengan persyaratan terkait sedemikian sehingga aspek kekuatan, kekakuan, dan kestabilan terpenuhi. Penampang yang sama kemudian digunakan untuk menilai perilaku struktur dengan variasi kekakuan sambungan dan sistem penahan beban lateral. Selanjutnya studi parametrik berupa penambahan lantai secara bertahap dilakukan

Tabel 1
Klasifikasi sambungan antar-modul (hasil analisis)

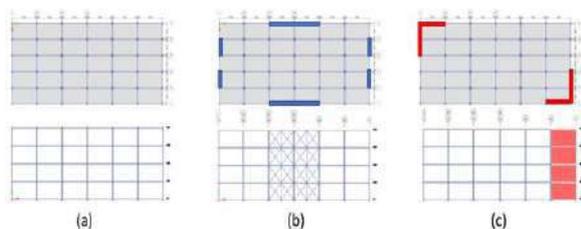
Klasifikasi Sambungan	Kode	Tipe Sambungan	Kinerja Sambungan	Ilustrasi Sambungan	Performa Sambungan	Research Gaps
	I.a	Sambungan baut twist and lock (Shi dkk., 2020)	Sendi		Menemukan initial rotational stiffness dari sambungan yang cukup tervalidasi secara teoritis dan percobaan.	Memiliki perilaku layaknya sendi dengan mengandalkan horizontal dan <i>vertical ties</i> sebagai <i>robustness</i> dari struktur
Sistem Sambungan <i>Interlocking</i> + Boks Konektor	I.b	Konektor dengan corner fitting (Chen dkk., 2019)	Semi Kaku		Inovasi sambungan dalam kolom memudahkan fleksibilitas dari segi arsitektural	Redundansi dari sambungan <i>interlocking</i> bergantung pada kapasitas kedua bagian pelat
	I.c	Sambungan VectorBloc (Dhanapal dkk., 2020)	Kaku		Adanya potensi untuk reduksi berat sambungan	Pola keruntuhan masih rentan getas fraktur pada sambungan.
	II.a	Sambungan batang baja berulir dengan shear key (Chna dkk., 2020)	Sendi		Model sederhana dan bermanfaat untuk keselarasan penampatan modul.	Sambungan tidak untuk seismik yang tinggi dan tidak meninjau interaksi dinding
Sistem Sambungan Batang Baja	II.b	Sambungan kabel baja pasca-tarik (Sanches dkk., 2018)	Semi Kaku		Adanya tambahan kapasitas akibat baja pasca-tarik	Kapasitas dari baja pasca-tarik termobilisasi secara efektif apabila adanya aksi komposit dengan kolom modul
	III.c	Sambungan kolom berulir diperkaku (Wang dkk., 2019)	Kaku		Adanya pengakuan meningkatkan kapasitas dibandingkan batang baja konvensional	Keterbatasan dalam aspek pemasangan dapat mengurangi poin produktivitas dalam bangunan modular
	III.a	Sambungan balok-ke-balok dengan tenon tanpa pengaku (Chen dkk., 2017)	Sendi		Sambungan dengan kapabilitas fleksibel dalam segi integrasi dengan sambungan lainnya.	Sambungan memiliki komponen yang bervariasi
Sistem Sambungan Baut + Pelat	III.b	Sambungan baut dengan pelat penutup (Deng dkk., 2018)	Semi Kaku		Dapat terklasifikasi kaku apabila terdapat pelat pengaku tambahan.	Sambungan yang rumit untuk dipasang dan masih membutuhkan pengelasan di lapangan.
	III.c	Sambungan baut dengan <i>bracket</i> (Lee dkk., 2018)	Kaku		Redundansi dari sambungan <i>bracket</i> berada pada elemen pelat, pelat pengaku dan baut yang tersambung	Adanya celah antar balok atas-bawah dapat mempengaruhi kinerja dan penyaluran gaya.

untuk masing-masing variasi struktur hingga mengalami kegagalan.

Tahap terakhir studi ini ialah studi fisibilitas terhadap penggunaan masing-masing jenis sambungan berdasarkan parameter kinerja sambungan yang dikembangkan oleh Pang (2016) sebagai berikut:

- Tahap Pemasangan Modul: berkaitan dengan seberapa mudah untuk menyelesaikan modul beserta rencana kontingensi apabila persyaratan tidak terpenuhi. Seberapa cepat dan biaya modifikasi dan pengaruh terhadap integritas struktur.
- Kekedapan Air: seberapa kedap sambungan pada masa operasional dan perlindungan terhadap korosi.
- Akses Inspeksi: adanya akses untuk inspeksi dan pemeliharaan beserta visibilitasnya.
- Keselamatan Lingkungan Kerja: keperluan terhadap peralatan tambahan dan potensi bahaya yang dihadapi pekerja.
- Sistem Modular: tingkat kompleksitas hibridisasi dari sistem modular.
- Fleksibilitas Arsitektur: tingkat fleksibilitas yang dapat diberikan oleh teknik penyambungan untuk tata letak arsitektur.

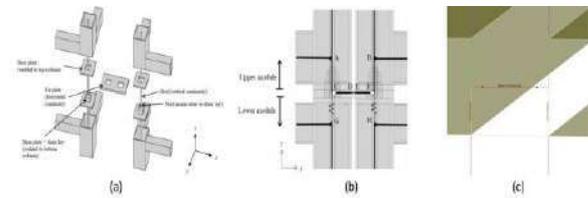
Struktur modular yang ditinjau diasumsikan terletak di Jakarta dengan karakteristik tanah lunak dan memiliki dimensi tipikal dengan panjang, lebar, dan tinggi masing-masing 6, 3, dan 3,3 m. Konfigurasi struktur modular untuk berbagai sistem penahan beban lateral dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) Sistem modular tanpa pengaku, (b) sistem modular terbreasing, dan (c) sistem modular dengan dinding geser beton

Mutu material yang digunakan ialah baja ASTM A572 Gr. 50 dan beton dengan kuat tekan (f_c') 35 MPa. Penampang kolom dan balok berturut-turut HSS228X228X16 dan HSS102X76X6,4. Pelat lantai dan langit-langit memiliki tebal 130 mm dan 2 mm dan dimodelkan sebagai diafragma semi-kaku secara kontinu. Elemen penahan gempa bresing menggunakan HSS76X76X6,4 sedangkan dinding geser memiliki tebal 100 mm. Sambungan antar modul diletakkan pada celah di antara modul sebesar 200

mm (untuk arah x , y , dan z) dan dimodelkan seperti pada Gambar 2. Kekakuan rotasional dihitung berdasarkan pendekatan yang tercantum pada Eurocode 3.



Gambar 2. (a) Detail sambungan antar-modul, (b) model pegas translasi sambungan, (c) pemodelan sambungan pada software ETABS. (Chua dkk., 2020)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum, hasil dari studi parametrik yang dilakukan mengonfirmasi bahwa kekakuan sambungan kaku pada sistem modul bertumpuk, terbreasing dan berdinding geser menghasilkan kondisi batas lantai yang tertinggi. Jumlah batas lantai pada sistem modul bertumpuk untuk sambungan berjenis kaku, semi-kaku dan sendi berturut-turut 11, 4 dan 2 lantai. Pada sistem terbreasing, berturut-turut 8, 6, dan 5. Untuk sistem bangunan modular dengan dinding geser, batas lantai berturut-turut 19, 14, dan 10.

Untuk membandingkan kinerja dari ketiga kekakuan sambungan tanpa adanya pengaruh dari sistem penahan beban lateral tambahan, hendak diambil kondisi batas sistem modul bertumpuk 4 lantai. Pengambilan pada sistem ini didasarkan oleh respon struktur berbasis modular yang hanya dipengaruhi oleh kekakuan sambungan antar modulnya.

3.1. Periode Natural Struktur

Tabel 2 menunjukkan bahwa periode natural struktur berkaitan erat dengan kekakuan sambungan antar modul yang digunakan. Hal ini ditandai dengan mengecilnya periode struktur seiring dengan bertambahnya kekakuan sambungan. Meski demikian, pengaruh tipe sambungan paling terlihat apabila struktur tidak memiliki sistem penahan beban lateral tambahan. Hal ini disebabkan karena sistem penahan beban lateral seperti bresing atau dinding geser memiliki kekakuan yang relatif tinggi, sehingga pengaruh kekakuan sambungan antar modul tidak lagi signifikan.

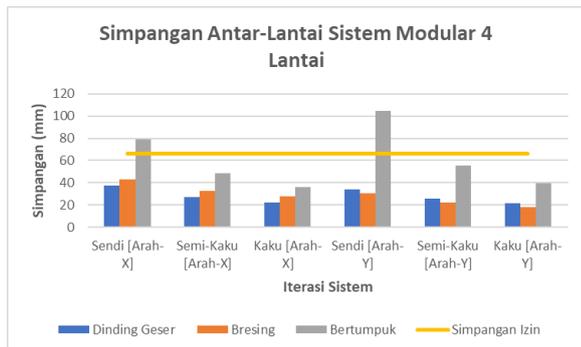
Tabel 2
Pengaruh kekakuan sambungan terhadap periode natural bangunan (hasil analisis)

Tipe Sambungan	Periode Natural (detik)		
	Bertumpuk	Terbresing	Dinding Geser
Sendi	1.112	0.644	0.354
Semi-kaku	0.808	0.566	0.333
Kaku	0.687	0.521	0.321

3.2. Simpangan Antar-Lantai

Berdasarkan Gambar 3, kekakuan sambungan berpengaruh terhadap simpangan struktur. Penggunaan sambungan yang lebih kaku mampu mereduksi simpangan antar lantai yang terjadi pada struktur, baik pada struktur tanpa pengaku, maupun pada struktur dengan bresing dan dinding geser. Hal ini sejalan dengan hasil analisis modal sebelumnya yang menunjukkan bahwa kekakuan sambungan mempengaruhi kekakuan struktur keseluruhan.

Di sisi lain, studi parametrik yang dilakukan untuk seluruh variasi struktur modular memperlihatkan bahwa parameter simpangan antar lantai menjadi pembatas utama dalam meningkatkan jumlah lantai.



Gambar 3. Simpangan antar-lantai sistem modular 4 lantai (hasil analisis)

3.3. Pengaruh P-Delta

Pengecekan pengaruh P-Delta sangat krusial untuk dilakukan pada konstruksi berbasis modular, dimana menurut Lawson (2012), ketidakselarasan struktur juga dapat diakibatkan dalam proses pemasangan dan instalasi modul. Maka perlu dipastikan bahwa persyaratan efek P-Delta tidak menyebabkan *vertikal out-of-alignment*. Gambar 4, menunjukkan bahwa dari masing-masing kondisi batas tidak didapatkan P-Delta yang berlebihan. Pengaruh kekakuan sambungan mengindikasikan bahwa semakin fleksibel sambungan, semakin rentan struktur terhadap fenomena ketidakselarasan vertikal.

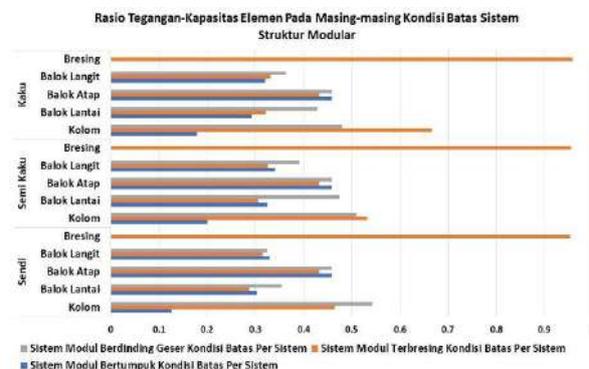


Gambar 4. Koefisien stabilitas struktur pada kondisi batas struktur (hasil analisis)

3.4. Rasio Kebutuhan Terhadap Kapasitas

Untuk dapat meninjau aspek kekuatan elemen struktur dari masing-masing sistem, perlu diketahui rasio kebutuhan terhadap kapasitas terbesar dari setiap elemen struktural terpasang. Gambar 5, menunjukkan hasil rasio untuk masing-masing kondisi batas sistem struktur. Dapat disimpulkan bahwa tegangan yang terjadi tidak mencapai 100% kapasitas elemen. Hal ini juga menunjukkan aspek yang membatasi dan mengontrol sifat bangunan berbasis modular ialah aspek kekakuan dibandingkan kekuatan (*deformation-controlled*). Meski demikian, penambahan sistem bresing menyebabkan perubahan sifat struktur yang awalnya dikontrol oleh kekakuan, kini menjadi dibatasi dari aspek kekuatan (*force-controlled*). Hal ini ditunjukkan dari rasio kebutuhan-kapasitas yang tinggi pada elemen kolom.

Kekakuan sambungan mempengaruhi transfer gaya dalam pada elemen, dimana semakin kaku sambungan, semakin besar gaya dalam yang terdistribusi dengan baik. Hal ini tercerminkan pada rasio elemen pada jenis sambungan kaku dibandingkan sambungan sendi.



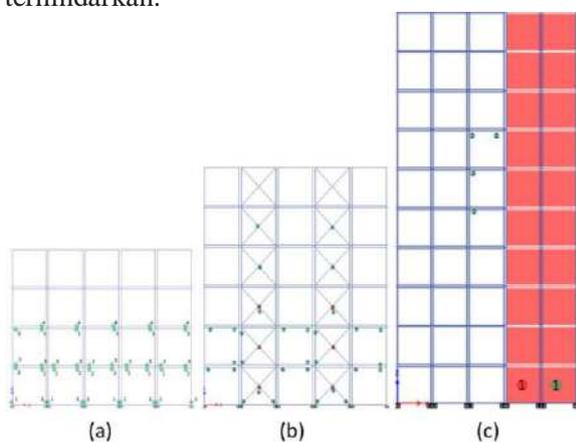
Gambar 5. Rasio tegangan-kapasitas elemen struktur pada bangunan modular (hasil analisis)

3.5. Kapasitas dan Performa Struktur

Rekapitulasi hasil kapasitas dan performa dari masing-masing kondisi batas sistem struktur melalui analisis non-linier *pushover* dapat dilihat pada Tabel 3, hingga Tabel 5. Dapat disimpulkan bahwa, seiring dengan bertambahnya lantai, nilai faktor kuat lebih berkurang. Hal ini selaras dengan penelitian-penelitian sebelumnya. [Sanches dkk., 2021; Oğuzhan dkk., 2017; Branci dkk., 2015]. Penambahan sistem penahan lateral tambahan, seperti bresing dan dinding geser, membantu menambah daktilitas pada struktur berbasis modular.

3.6. Pola Kelelahan Struktur

Secara umum, kekakuan sambungan tidak secara signifikan mempengaruhi pola kelelahan masing-masing sistem. Pola kelelahan struktur menunjukkan kecenderungan struktur untuk gagal dalam kondisi yang direncanakan (keruntuhan daktail). Gambar 6 (a) memperlihatkan bahwa untuk sistem modul bertumpuk, kelelahan terjadi pertama kali pada balok yang kemudian diikuti oleh kelelahan pada kolom untuk lantai rendah. Seiring dengan bertambahnya lantai, kelelahan terjadi pada beberapa kolom lantai terbawah. Fenomena ini sejalan dengan temuan Gunawardena (2016) dimana pola kelelahan kolom bawah untuk sistem berbasis modular tidak terhindarkan.



Gambar 6. Pola pembentukan sendi plastis tipikal
(a) modul tanpa pengaku,
(b) modul terbresing, dan
(c) modul dengan dinding geser beton

Untuk sistem terbresing yang ditunjukkan pada Gambar 6 (b), kelelahan pertama terjadi pada bresing. Setelah bresing mencapai kapasitasnya, gaya yang berlebih tersebut hendak di transferkan terhadap balok dan kolom yang terpasang. Pola pembentukan sendi plastis yang didapatkan

setelah bresing adalah kolom lantai bawah dan balok. Gambar 6 (c), menunjukkan pola keruntuhan untuk sistem dengan dinding geser. Untuk sistem ini sendi plastis terjadi pada dasar dinding geser terlebih dahulu sebelum plastifikasi terjadi pada balok yang diikuti dengan pembentukan sendi plastis pada kolom.

3.7. Fisibilitas Sambungan Antar-Modul

Penggunaan ketiga jenis sambungan yang terdapat pada Tabel 1 (sambungan *interlocking* + boks konektor, sambungan batang baja, dan sambungan baut-plat) ditinjau sesuai enam parameter yang sudah disesuaikan dengan kondisi di Indonesia.

Apabila ditinjau dari tahap pemasangan modul, sambungan dengan jenis *interlocking* + boks konektor menawarkan kemudahan pemasangan dibandingkan kedua jenis sambungan lainnya. Sambungan batang baja memerlukan upaya lebih dalam tahapan penyelarasan pada atas-bawah modul, sedangkan sambungan baut-plat membutuhkan ketelitian fabrikasi dan upaya lebih pada tahap pemasangan. Keseluruhan sambungan menawarkan proses instalasi yang tipikal untuk

sambungan pojok, tepi, maupun interior. Terkecuali untuk sambungan III.b yang kurang cocok apabila diaplikasikan sebagai sambungan interior ditambah lagi dengan pengelasan *on-site*.

Sebagai konsekuensi dari suatu sistem modular yang sangat diskrit, maka penggunaan sistem ini di negara tropis seperti Indonesia aspek kedap air perlu dipertimbangkan. Sambungan tipe batang baja internal memiliki taraf kedap air yang sangat baik.

Hal ini disebabkan karena sambungan dengan jenis tipe ini pada umumnya menutup rapat daerah sambungan setelah batang baja terpasang di dalam kolom pada modul yang berdekatan. Pada sambungan I.a dan I.b, sambungan dapat dilindungi dengan relatif mudah, berbeda dengan sambungan I.c yang memerlukan upaya lebih untuk menjamin kedap air diantara sambungan modul. Di sisi lain, sambungan III.a dan III.b memiliki kedap air yang baik karena masing-masing sambungan memiliki fitur untuk menutupi baut. Posisi sambungan sambungan III.a yang berada di dalam dinding membuatnya terlindungi sedangkan sambungan III.b mengandalkan pelat yang dilas ke elemen kolom. Pada sambungan III.c diperlukan pekerjaan tambahan untuk melindungi baut dari paparan cuaca maupun memastikan kedap air terhadap air.

Tabel 3
Kapasitas dan faktor performa sistem modul tanpa pengaku (hasil analisis)

Sistem Struktur	Keterangan	Simbol	Rumus	Sendi		Semi Rigid		Kaku	
				x	y	x	y	x	y
Sistem Modul Tanpa Pengaku (Unbraced)	Gaya Geser Leleh (kN)	Vy	-	33394.95	30389.23	33394.95	30389.23	27964.44	8439.86
	Gaya Geser Ultimat (kN)	Vu	-	35014.25	30605.67	35014.25	30605.67	41299.36	41974.19
	Gaya Geser Desain (kN)	Vd	-	5385.00	5385.00	10768.00	10768.00	14687.00	1860.08
	Kuat Lebih Sistem	Ω	Vy/Vd	6.20	5.64	3.10	2.82	1.90	4.54
	Simpangan Ultimat (mm)	Δu	-	272.00	272.00	552.00	552.00	1435.46	1532.00
	Simpangan Leleh (mm)	Δy	-	222.15	255.20	349.17	387.15	892.16	286.53
	Daktilitas (Deformation-Based)	μd	$\Delta u/\Delta y$	1.22	1.07	1.58	1.43	1.61	5.35
	Daktilitas (Force-Based)	μf	Vu/Vy	1.05	1.01	1.05	1.01	1.48	4.97

Tabel 4
Kapasitas dan faktor performa sistem modul terbracing (hasil analisis)

Sistem Struktur	Keterangan	Simbol	Rumus	Sendi		Semi Rigid		Kaku	
				x	y	x	y	x	y
Sistem Modul Terbracing	Gaya Geser Leleh (kN)	Vy	-	11102.37	12253.73	13305.18	9422.76	12560.00	15077.87
	Gaya Geser Ultimat (kN)	Vu	-	25398.12	22462.85	32627.05	30178.08	35217.41	34098.10
	Gaya Geser Desain (kN)	Vd	-	2187.00	2187.00	2625.17	2625.17	3500.08	3500.08
	Kuat Lebih Sistem	Ω	Vy/Vd	5.08	5.60	5.07	3.59	3.59	4.31
	Simpangan Ultimat (mm)	Δu	-	712.91	591.45	649.96	529.23	742.27	660.26
	Simpangan Leleh (mm)	Δy	-	159.67	136.92	183.32	81.89	208.02	204.34
	Daktilitas (Deformation-Based)	μd	$\Delta u/\Delta y$	4.46	4.32	3.55	6.46	3.57	3.23
	Daktilitas (Force-Based)	μf	Vu/Vy	2.29	1.83	2.45	3.20	2.80	2.26

Tabel 5
Kapasitas dan faktor performa sistem modul berdingg geser beton (hasil analisis)

Sistem Struktur	Keterangan	Simbol	Rumus	Sendi		Semi Rigid		Kaku	
				x	y	x	y	x	y
Sistem Berdingg Geser Beton	Gaya Geser Leleh (kN)	Vy	-	9146.42	11526.60	4891.59	10929.41	7802.41	10212.08
	Gaya Geser Ultimat (kN)	Vu	-	51903.95	62834.91	49683.32	65925.52	68224.57	70419.92
	Gaya Geser Desain (kN)	Vd	-	4516.51	4516.51	4906.55	4906.55	5291.00	5291.00
	Kuat Lebih Sistem	Ω	Vy/Vd	2.03	2.55	1.00	2.23	1.47	1.93
	Simpangan Ultimat (mm)	Δu	-	1088.57	1392.00	1440.90	1952.00	2519.49	2652.00
	Simpangan Leleh (mm)	Δy	-	161.73	215.96	128.49	287.93	275.00	353.32
	Daktilitas (Deformation-Based)	μd	$\Delta u/\Delta y$	6.73	6.45	11.21	6.78	9.16	7.51
	Daktilitas (Force-Based)	μf	Vu/Vy	5.67	5.45	10.16	6.03	8.74	6.90

Sambungan pada bangunan berbasis modular dapat dikatakan lebih terkontrol dan berkualitas dibanding sambungan bangunan konvensional yang umumnya melibatkan pekerjaan pengelasan. Meski demikian, upaya inspeksi dan pemeliharaan tetap perlu dilaksanakan sepanjang masa operasional bangunan. Sistem sambungan *interlocking* dan sambungan baut-pelat memberikan kemudahan

dalam hal pemeliharaan, terkecuali untuk sambungan III.b yang memiliki keterbatasan untuk inspeksi dan pemeliharaan karena baut sepenuhnya tertutup oleh pelat yang di las ke kolom. Sama halnya dengan sistem sambungan batang baja dimana batang baja tersimpan di dalam kolom sehingga menyulitkan pemeliharaan dilakukan.

Tabel 6
Kajian fisibilitas penerapan sambungan antar-modul (hasil analisis)

Jenis Sambungan	Sambungan Antar Modul			Contoh Penelitian Sambungan	Parameter Fisibilitas						Total
	Kinerja Sambungan	Kode Sambungan			I	II	III	IV	V	VI	
Sistem Sambungan Interlocking + Boks Konektor	Sendi	I.A		Baut twist and lock (Shi dkk., 2020)	4	2	4	2	1	5	18
	Semi Kaku	I.B		Konektor dengan corner fitting (Chen dkk., 2019)	3	3	3	2	1	5	17
	Kaku	I.C		Sambungan VectorBloc (Dhanapaldkk., 2019)	2	2	4	2	1	2	13
Sistem Sambungan Batang Baja	Sendi	II.A		Batang baja berulir shear key (Chua dkk., 2019)	3	4	4	2	1	5	19
	Semi Kaku	II.B		Batang baja pasca-tarik (Lacey dkk., 2020)	3	4	1	2	1	5	16
	Kaku	II.C		Kolom berulir diperkaku (Y. Wang dkk., 2019)	3	4	1	1	1	5	15
Sistem Sambungan Baut Pelat	Sendi	III.A		Sambungan balok-ke-balok dengan tenon tanpa pengaku (Chen dkk., 2019)	3	2	4	4	3	2	18
	Semi Kaku	III.B		Sambungan baut dengan pelat penutup (Deng dkk., 2017)	2	3	4	3	4	1	17
	Kaku	III.C		Sambungan baut dengan braket (Lee dkk., 2018)	1	3	4	3	4	1	16



Aspek keselamatan kerja pada proses pengerjaan sambungan antar-modul bergantung pada protokol keselamatan kerja dan tingkat kompleksitas komponen penyusun sambungan. Jenis sambungan batang baja dan *interlocking* pada realitanya memiliki komponen penyusun yang bervariasi dan banyak. Hal ini dapat meningkatkan resiko apabila pekerjaan pemasangan berada pada ketinggian maupun kondisi yang tidak aman. Sebagai alternatif, penggunaan sambungan III.a dapat menghindari resiko pekerja terhindar resiko jatuh dari ketinggian karena pemasangan sambungan dapat dilakukan dari dalam modul.

Didekati dari aspek sistem modular, jenis sambungan batang baja dan *interlocking* sudah secara spesifik dipergunakan untuk jenis, ukuran dan konfigurasi tertentu. Hal ini menghasilkan sambungan yang tidak dapat diintegrasikan dengan sambungan lain. Di sisi lain, jenis sambungan baut-plat memiliki potensi integrasi yang lebih tinggi. Seluruh sambungan memiliki kemampuan untuk dibongkar-pasang kecuali sambungan III.b. Integrasi modul dengan sistem penahan beban lateral seperti bresing maupun dinding geser dapat menemui hambatan apabila sambungan III.a digunakan.

Ketiga jenis sambungan relatif baik jika ditinjau dari aspek keleluasaan arsitektural dimana semua sambungan terletak di dalam kolom sehingga memberi disrupsi arsitektural yang minim. Akan tetapi, ketebalan dan dimensi pelat tengah pada jenis sambungan batang baja dapat mempengaruhi dimensi celah antar modul. Di samping itu, pada sambungan III.a apabila modul tidak memiliki sekat yang banyak maka sambungan tidak dapat disembunyikan di dalam dinding. Oleh karenanya untuk menutupi sambungan, lantai perlu dibuat lebih tinggi.

Tabel 6 menunjukkan ketiga jenis sambungan tipikal yang kerap ditemukan pada struktur modular beserta contoh dan klasifikasi kinerja yang ditemukan oleh penelitian sebelumnya. Sesuai dengan Gambar 7, dapat dikonfirmasi bahwa semakin kaku kinerja dari sambungan, semakin memberikan kesulitan dalam aspek pengerjaan. Sambungan yang terklasifikasi sebagai sendi dan semi-kaku lebih umum digunakan karena menawarkan kemudahan pada tahap instalasi di lapangan dan dapat dibongkar-pasang. Pekerja dengan keahlian khusus beserta kontrol mutu yang relatif lebih sulit juga akan menjadi hambatan dalam memilih sambungan yang diharapkan untuk bersifat kaku.

4. KESIMPULAN

Sesuai dengan hasil studi yang dilakukan, penggunaan bangunan berbasis modular masih dibatasi oleh kekakuannya. Untuk mencapai bangunan modular tingkat tinggi, perlu disertai oleh penggunaan sistem stabilisasi tambahan dan penjaminan kekakuan sambungan yang memadai. Kekakuan rotasi sambungan berkaitan erat dengan perilaku struktur secara keseluruhan. Peningkatan kekakuan rotasi sambungan mampu meningkatkan kekakuan struktur. Hal ini ditandai dengan mengecilnya periode natural serta simpangan yang terjadi pada struktur. Di samping itu, sambungan kaku juga mampu mengurangi pengaruh P-delta dan memungkinkan penambahan lantai pada struktur modular tanpa disertai perubahan dimensi penampang.

Berdasarkan temuan dan analisis fisibilitas penggunaan sambungan antar modul, dapat disimpulkan bahwa secara kinerja struktural, sambungan dengan klasifikasi kekakuan yang sangat kaku memberikan kinerja struktural yang ideal. Akan tetapi, penyeimbangan antara aspek performa struktural dengan aspek manajemen konstruksi merupakan kunci untuk meningkatkan keuntungan penggunaan konstruksi berbasis modular dibandingkan konstruksi konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- Branci, T., dan D. Yahmi., 2015, Estimating of Overstrength Factor of Concentrically X-Braced Steel Frames, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete Island, Greece, 25–27 May 2015
- Chen, Z., Liu, J., dan Yu, Y., 2017, Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings, *Engineering Structures*, Vol. 147, Hal. 625–638.
- Chen, Z., Liu, Y., Zhong, X., dan Liu, J., 2019, Rotational Stiffness of Inter-Module Connection in Mid-Rise Modular Steel Buildings, *Engineering Structures*, Vol 196.
- Chua, Y. S., Liew, J.Y. R. dan Pang, S. D., 2020 Modeling of Connections and Lateral Behavior of High-Rise Modular Steel Buildings, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 166.
- Deng, E. F., Zong, L., Ding, Y., Dai, X. M., Lou, N., dan Chen, Y., 2018, Monotonic and Cyclic Response of Bolted Connections

- With Welded Cover Plate for Modular Steel Construction, *Engineering Structures*, Vol. 167, Hal. 407-419.
- Dhanapal, J., Ghaednia, H., Das, S., dan Velocci, J., 2020, Behavior of Thin-Walled Beam-Column Modular Connection Subject to Bending Load, *Thin-Walled Structures*, Vol. 149
- Gunawardena, T., Ngo, T., dan Mendis, P., 2016, Behaviour of Multi-Storey Prefabricated Modular Buildings Under Seismic Loads, *Earthquakes and Structures*, No. 6, Vol. 11, Hal. 1061–1076.
- Gunawardena, T., Ngo, T., Mendis, P., dan Alfano, J., 2016, Innovative Flexible Structural System Using Prefabricated Modules, *Journal of Architectural Engineering*, No. 4, Vol. 22.
- Lawson, M., Ogden, R., dan Goodier, C., 2019, *Design in Modular Construction*, Vol. 1, Ed. 1, CRC Press.
- Lee, S., Park, J., Shon, S., dan Kang, C., 2018, Seismic Performance Evaluation of The Ceiling-Bracket-Type Modular Joint with Various Bracket Parameters, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 150, Hal. 298-325.
- Liew, J.Y.R., Chua, Y.S., dan Dai, Z., 2019, Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-Rise Buildings, *Structures*, Vol. 21, Hal. 135-149.
- Oğuzhan Çetindemir, 2017, An Evaluation on Overstrength Factors of Reinforced Concrete Buildings, 4th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Eskisehir, Turkey, October 11-13, 2017
- Pang, S. D., Liew, J. Y. R., Dai, Z., dan Wang, Y., 2016, Prefabricated Prefinished Volumetric Construction Joining Techniques Review, 2016 Modular and Offsite Construction (MOC) Summit, Edmonton, 29 September - 1 Oktober 2016.
- Sanches, R., Mercan, O., dan Roberts, B., 2018, Experimental Investigations of Vertical Post-Tensioned Connection for Modular Steel Structures, *Engineering Structures*, Vol. 175, Hal. 776-789.
- Sanches, R., Tao, J., Fathieh, A., dan Mercan, O., 2021, Investigation of the Seismic Performance of Braced Low-, Mid- and High-Rise Modular Steel Building Prototypes, *Engineering Structures*, Vol. 234.
- Shi, F., Wang, H., Zong, L., Ding, Y., dan Su, J., 2020, Seismic Behavior of High-Rise Modular Steel Constructions With Various Module Layouts, *Journal of Building Engineering*, Vol. 3.
- Wang, Y., Xia, J., Ma, R., Xu, B., dan Wang, T., 2019, Experimental Study on the Flexural Behavior of an Innovative Modular Steel Building Connection with Installed Bolts in the Columns, *Applied Science*, No.17, Vol. 9.