

STUDI PERBANDINGAN PERILAKU DAN KINERJA STRUKTUR BAJA MENGUNAKAN KOLOM KOMPOSIT *CONCRETE ENCASED* DAN *CONCRETE FILLED TUBE*, SERTA NON KOMPOSIT

I Ketut Diartama Kubon Tubuh¹, Made Sukrawa² dan I Gede Adi Susila³

^{1,2,3} Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Udayana
Email: diartama.k@gmail.com

ABSTRAK

Studi perbandingan perilaku dan kinerja struktur baja menggunakan kolom komposit dan non komposit dilakukan dengan membuat lima model struktur. Satu model menggunakan kolom baja *wide flange* (MS), dua buah model dengan kolom komposit *concrete encased* lingkaran (MCEC) dan persegi (MCES), serta dua buah model dengan kolom komposit *concrete filled tube* lingkaran (MCFTC) dan persegi (MCFTS). Dimensi kolom lantai IV-V dibuat lebih kecil dari dimensi kolom tiga lantai di bawahnya. Perilaku struktur diamati dari hasil analisis elastis berupa simpangan dan simpangan antar lantai. Sedangkan kinerja struktur dievaluasi dengan analisis statik non linier *Pushover* menggunakan SAP2000[®]. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan kisaran rasio P-M kolom sebesar 0,79 sampai 0,88, semua model tidak memenuhi simpangan antar lantai ijin di lantai I, II, dan IV. Penanggulangan dilakukan dengan mengubah orientasi setengah dari total kolom model MS (selanjutnya menjadi MS-R), pembesaran kolom lantai IV-V model MS-R dan MCFTC, serta pemasangan delapan buah bresing-X di lantai dasar semua model. Hasil analisis *Pushover* menunjukkan level kinerja semua model adalah *Immediate Occupancy* (IO) kecuali model MCFTS. Model MCFTS yang memiliki level kinerja *Collapse* (C) diperbaiki dengan mempertebal dinding baja profil (selanjutnya menjadi MFCTS-Improved) dan menghasilkan level kinerja IO. Perhitungan biaya material struktur menunjukkan model dari yang paling mahal sampai yang paling murah berturut-turut adalah MS-R, MCFTS-Improved, MCEC, MCES, dan MCFTC dengan perbandingan 1:0,99:0,88:0,87:0,86.

Kata kunci: *concrete encased (CE), concrete filled tube (CFT), bresing-X, analisis Pushover*

COMPARISON STUDY OF BEHAVIOR AND STEEL STRUCTURE PERFORMANCE USING CONCRETE ENCASED COMPOSITE COLUMN AND CONCRETE FILLED TUBE, AND NON COMPOSITE

ABSTRACT

Comparative study of steel structure behavior and performance using composite and non composite columns were done by making five structure models. A model using wide flange steel columns, two models with circular and square *concrete encased* columns (MCEC and MCES), also two models with circular and square *concrete filled tube* columns (MCFTC and MCFTS). Columns on 4th-5th floor are smaller than columns on three floors below. Structure behavior were observed through elastic analysis which are displacement and interstorey drift. While structure performance were evaluated through non linear static *Pushover* analysis using SAP2000[®]. The analysis showed that with P-M ratio ranging from 0.79 until 0.88, all models interstorey drifts were exceed limit on 1st, 2nd and 4th floors. Countermeasures were done by rotating half of total MS steel columns (then became MS-R), enlarging 4th-5th floor columns on MS-R and MCFTC, and also installing eight X-bracings on all models ground floor. *Pushover* analysis showed that performance level of all models are *Immediate Occupancy* (IO) except MCFTS. MCFTS model which in *Collapse* (C) performance level were improved by increasing thickness of steel section (then became MCFTS-Improved) and resulting IO performance level. Calculation of structure materials cost showed the most expensive until the cheapest models respectively were MS-R, MCFTS-Improved, MCEC, MCES, and MCFTC with comparison 1:0,99:0,88:0,87:0,86.

Keywords: *concrete encased (CE), concrete filled tube (CFT), X-bracing, Pushover analysis*

1. PENDAHULUAN

Material baja banyak digunakan sebagai material struktur gedung tinggi dan gedung dengan struktur bentang panjang. Hal tersebut dikarenakan material baja memiliki kelebihan antara lain kekuatannya lebih tinggi, lebih ringan, lebih daktail, dan memiliki produktivitas yang lebih dari material beton. Namun, apabila dikompositkan dengan material beton, akan meningkatkan kekuatan dan kekakuan elemen struktur. Salah satu elemen struktur dengan menggunakan komposit baja-beton adalah pada kolom. Kolom komposit baja-beton yang umum adalah kolom baja terbungkus beton atau kolom baja terisi beton.

Kolom komposit baja terbungkus beton atau *Concrete Encased* (CE) dibuat dengan membungkus profil baja dengan beton bertulang berbentuk lingkaran, segi empat atau lebih. Sedangkan kolom komposit baja terisi beton atau *Concrete Filled Tube* (CFT) dibuat dengan cara mengisi beton pada profil baja berongga berbentuk lingkaran atau segi empat. Pada kolom komposit CFT lingkaran, kekuatan tekan beton di dalam profil baja berongga dapat meningkat mencapai 50% dari kuat tekan silinder beton tanpa pengekanan akibat efek pengekanan dari profil baja berongga (Schneider, et al., 2004). Inti beton juga dapat mencegah terjadinya tekuk lokal dari profil baja yang diisi olehnya, sehingga lebih baik dalam mencegah terjadinya tekuk lokal dibandingkan dengan kolom profil baja berongga saja tanpa pengisi beton. Lebih dari itu, profil baja berongga dapat digunakan sebagai cetakan permanen beton. Keunggulan ini tentunya dapat mengurangi waktu dan biaya konstruksi (Liang, 2015). Akan tetapi, kolom komposit CFT memiliki kelemahan yaitu kurang tahan api dan korosi. Tidak seperti kolom komposit CE, beton bertulang yang membungkus baja profil yang dapat menghalangi paparan api dan zat korosif tersebut.

Pada saat terjadi gempa, kekakuan dari kolom-kolom berperan menahan gaya lateral dan berdeformasi. Perilaku struktur dengan kolom komposit, baik CE maupun CFT, dan kolom non komposit dalam berdeformasi atau mengalami simpangan struktur dapat diamati. Sehingga, dengan kapasitas aksial dan lentur yang sama dapat dinilai struktur dengan kemampuan layan yang terbaik. Namun, apabila gempa yang terjadi lebih besar, kemampuan struktur berdeformasi elastis akan terlampaui dan terbentuk sendi plastis.

Struktur dengan kinerja yang baik mampu menyebar gaya-gaya dalam ke seluruh elemen-elemen strukturnya, sehingga masih memiliki kemampuan untuk bertahan meskipun sudah mencapai ambang keruntuhan. Untuk mengevaluasi kinerja struktur dapat dilakukan dengan analisis statis non linier *Pushover*. Analisis statis non linier *Pushover* dilakukan dengan memberikan pola beban statis tertentu yang besarnya ditingkatkan sampai struktur tersebut mencapai *target displacement* tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu. Dari hasil analisis dapat digambarkan hubungan antara *base shear* dan *roof displacement*, hubungan tersebut kemudian dipetakan sebagai kurva kapasitas struktur (California Seismic Safety Commission, 1996).

Banyak penelitian mengenai kolom komposit CFT dilakukan, namun tidak ada yang membandingkan kolom komposit CFT dengan kolom komposit CE dan non komposit dalam sebuah struktur. Maka dari itu dilakukan studi dengan membuat model struktur baja menggunakan kolom komposit CE dan CFT, serta non komposit. Kemudian dibandingkan perilaku, kinerja, dan harga strukturnya.

2. DESAIN STRUKTUR BAJA

Secara umum, perancangan elemen-elemen struktur baja dapat dilakukan dengan mengikuti ketentuan pendesainan komponen struktur penahan gabungan lentur dan aksial tekan. Proses desain tersebut dilakukan dengan mengontrol perbandingan rasio aksial-lentur (rasio P-M). Pada struktur rangka penahan momen, elemen balok dan kolom umumnya menggunakan profil baja *Wide Flange* (W) yang memiliki simetri ganda. Penamaan dan dimensi profil-profil baja mengacu pada standar yang tercantum pada AISC Steel Construction Manual (American Institute of Steel Construction, 2011). Kontrol rasio P-M untuk komponen struktur penahan gabungan lentur dan aksial bersimetri ganda tersebut mengikuti Persamaan (1) untuk $\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2$ dan Persamaan (2) untuk

$$\frac{P_r}{P_c} \leq 0,2.$$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (1)$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \leq 1,0 \quad (2)$$

keterangan:

P_r : kuat aksial perlu (N)

P_c : kapasitas kuat aksial (N)

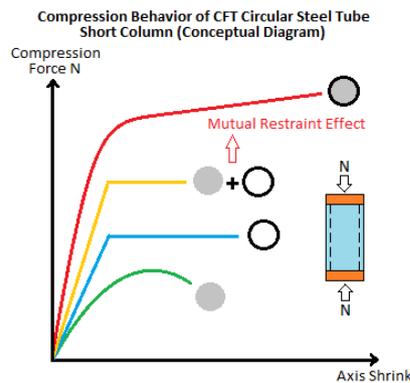
M_r : kuat lentur perlu (N mm)

M_c : kapasitas kuat lentur (N mm)

x dan y : subskrip untuk pelenturan arah sumbu kuat dan sumbu lemah

Pada struktur baja yang menggunakan kolom komposit, kolom komposit baja terbungkus beton atau kolom *Concrete Encased* (CE) dibuat dari profil baja *Wide Flange* (WF) yang dibungkus beton bertulang. Sedangkan

kolom komposit *Concrete Filled Tube* (CFT) dibuat dengan mengisi beton ke dalam profil baja berongga, baik persegi ataupun lingkaran. Perbedaan karakteristik antara kedua jenis kolom komposit tersebut adalah adanya peningkatan kekuatan tekan beton akibat efek yang saling mengekang pada kolom komposit CFT. Oleh karena adanya efek pengekgangan tersebut, kapasitas *ultimate* dari kolom komposit CFT adalah lebih besar dari jumlah kekuatan masing-masing komponen beton dan profil baja berongga. Ilustrasi perbandingan kekuatan antara masing-masing komponen dan kolom komposit CFT dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Efek saling mengekang pada kolom komposit CFT
Sumber: Nakashima (2010)

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa kekuatan kolom komposit CFT akibat pengekgangan oleh beton dan profil baja berongga menjadi lebih besar dibandingkan dengan penjumlahan kekuatan masing-masing komponen beton ditambah dengan profil baja berongga. Terdapat faktor yang membuat kekuatan beton meningkat akibat efek pengekgangan tersebut. Selain itu, adanya beton di dalam profil baja berongga mampu menahan profil baja berongga tersebut mengalami tekuk lokal. Sedangkan profil baja berongga mengekang beton sehingga meningkatkan kekuatan dan kemampuan berdeformasi.

Pada studi yang dilakukan oleh Susantha, et al. (2001), prediksi besarnya peningkatan kuat tekan beton (f_{cc}') akibat pengekgangan dianalisis dari banyak eksperimen yang dilakukan oleh sejumlah peneliti. Penampang benda-benda uji tersebut ada yang berbentuk lingkaran, persegi, dan segi delapan. Namun, yang ditinjau pada studi ini adalah penampang lingkaran dan persegi. Parameter-parameter yang digunakan memprediksi peningkatan kuat tekan beton salah satunya adalah rasio mutu beton dengan mutu baja. Dari 19 buah dan 13 buah data prediksi peningkatan mutu beton untuk penampang lingkaran dan persegi yang bervariasi besarnya, dilakukan pemilihan berdasarkan parameter rasio mutu beton dengan mutu baja. Didapat peningkatan kuat tekan beton untuk penampang lingkaran sebesar 49,9% dan untuk penampang persegi sebesar 21,7%. Selain itu, Schneider, et al. (2004) menyatakan kekuatan tekan beton di dalam profil baja berongga pada kolom komposit CFT dapat meningkat akibat efek pengekgangan dari profil baja berongga yang mencapai 50% dari kuat tekan silinder beton tanpa pengekgangan.

Selain mendesain kekuatan elemen pada struktur baja, juga dilakukan kontrol simpangan antar lantai. SNI 1726:2012 pasal 7.8.6 mengatur simpangan antar lantai akibat gempa desain (Δ_I) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (3). Defleksi pusat massa di tingkat ke- x (δ_x) harus ditentukan sesuai dengan Persamaan (4).

$$\Delta_I = \delta_x - \delta_{x-1} \quad (3)$$

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{xe}}{I_e} \quad (4)$$

keterangan:

C_d : faktor amplifikasi defleksi dalam Tabel 9 SNI 1726:2012

δ_{xe} : defleksi pada lokasi yang disyaratkan yang ditentukan dengan analisis elastis

I_e : faktor keutamaan gempa

Simpangan antar lantai desain (Δ_I) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai ijin (Δ_a) sebesar 2% dari tinggi lantai, seperti didapatkan dari Tabel 16 pada SNI 1726:2012.

Ketidakteraturan struktur vertikal tidak berlaku jika tidak ada rasio simpangan antar lantai per tinggi lantai (*drift ratio*) antar lantai akibat gaya seismik lateral desain yang nilainya lebih besar dari 130% rasio simpangan antar lantai per tinggi lantai pada tingkat di atasnya. Hubungan *drift ratio* untuk dua tingkat teratas struktur bangunan tidak perlu dievaluasi. Terjadinya *soft story* pada suatu lantai apabila memenuhi Persamaan (5).

$$D_{r-i} > 1,3 \cdot D_{r-i+1} \quad (5)$$

keterangan:

D_{r-i} : rasio simpangan antar lantai per tinggi lantai (Δ_i/h_i) ke- i

Δ_i : simpangan antar lantai ke- i

h_i : tinggi lantai ke- i

Proses perencanaan tahan gempa berbasis kinerja dimulai dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan simulasi kinerja terhadap kejadian gempa. Setiap simulasi memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur, sehingga dapat memperkirakan keselamatan, kesiapan pakai dan kerugian harta benda yang akan terjadi. Pada FEMA 273 (Building Seismic Safety Council, 1997) disebutkan kategori-kategori level kinerja struktur antara lain *Operational* (O), *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), *Collapse Prevention* (CP), dan *Collapse* (C).

Sendi plastis dimodelkan memiliki perilaku non linier hubungan gaya-perpindahan atau momen-rotasi. Sendi plastis kolom adalah tipe *default* P-M2-M3 dengan pertimbangan bahwa elemen kolom menahan gaya aksial dengan momen lentur (diagram interaksi P-M). Sedangkan untuk balok adalah tipe *default* V2-M3, dengan pertimbangan bahwa balok efektif menahan gaya geser pada sumbu lemah dan momen lentur terhadap arah sumbu kuat. Sendi plastis diasumsikan terletak pada masing-masing ujung pada elemen balok dan kolom (Wibowo, et al., 2010). Warna untuk setiap kondisi sendi plastis pada program SAP2000[®] adalah sebagai berikut.

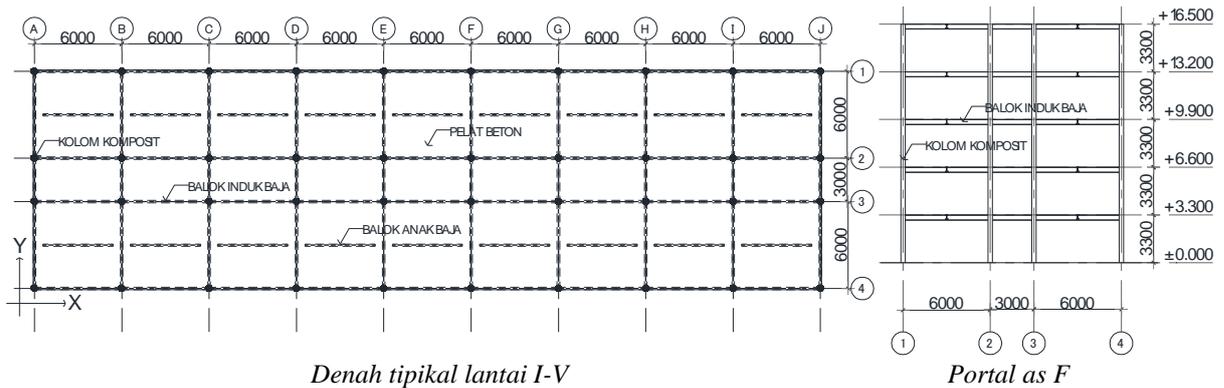
1. Kondisi elastis, belum terbentuk sendi plastis.
2. Batas elastis, sendi plastis terbentuk dengan warna ungu.
3. *Immediate Occupancy* (IO), sendi plastis terbentuk dengan warna biru tua.
4. *Life Safety* (LS), sendi plastis terbentuk dengan warna biru muda.
5. *Collapse Prevention* (CP), sendi plastis terbentuk dengan warna hijau.
6. *Collapse* (C), sendi plastis terbentuk dengan warna kuning.
7. *Residual point*, sendi plastis terbentuk dalam warna oranye.
8. Runtuh, sendi plastis terbentuk dalam warna merah.

Pendefinisian sendi plastis pada kolom komposit tidak dapat dilakukan karena literatur yang menyatakan hal tersebut belum tersedia. Sehingga perlu diambil asumsi bahwa kolom komposit adalah kolom baja dengan *section properties* dari kolom komposit. *Section properties* yang dimodifikasi adalah *Cross-sectional (axial) Area*, *Shear Area*, *Torsional Constant*, *Moment of Inertia*, dan *Mass* atau *Weight*. Pada Table 9-6 ASCE 41-13, tidak ditentukan *acceptance criteria* untuk kolom baja dengan penampang lingkaran. Sehingga penentuan sendi plastis pada kolom MCFTC dilakukan dengan mengasumsikan profil dengan kolom baja pengganti berbentuk persegi.

Kriteria evaluasi level kinerja kondisi bangunan didasarkan pada gaya dan deformasi yang terjadi ketika perpindahan titik kontrol minimal sama dengan perpindahan target (δ_T). Jadi parameter perpindahan target sangat penting peranannya bagi perencanaan berbasis kinerja. Beberapa metode yang digunakan untuk menentukan perpindahan target adalah *Coefficient Method* FEMA 356.

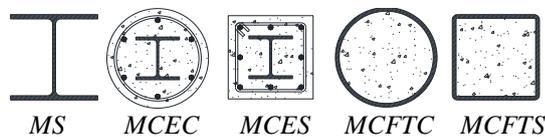
3. METODE

Ditinjau suatu struktur bangunan gedung kantor fiktif yang berlokasi di Denpasar, Bali. Gedung berlantai lima dengan denah tipikal dari lantai I sampai lantai V. Tinggi antar lantai adalah sama, yaitu setinggi 3,3 m. Gedung terdiri atas sepuluh buah portal melintang A sampai dengan J dengan Sistem Rangka Penahan Momen Khusus (SRPMK). Satu buah portal melintang terdiri atas tiga bentang. Panjang bentang-bentang ujungnya sebesar 6 m, sedangkan panjang bentang bagian tengah sebesar 3 m. Jarak antar portal melintang sebesar 6 m. Gambar denah tipikal untuk kelima lantai dan portal disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah dan portal model struktur

Gedung yang ditinjau dibuat menjadi lima buah model struktur. Balok induk dan balok anak semua model menggunakan material baja. Pelat menggunakan material beton bertulang yang dikompositkan balok anak baja. Sedangkan kolom, dibedakan tipenya untuk setiap model yaitu, model *Steel* (MS) adalah model struktur yang menggunakan kolom-kolom baja profil *Wide Flange* (W), model *CE circular* (MCEC) dan *square* (MCES) adalah model struktur yang menggunakan kolom-kolom komposit baja profil W dibungkus beton bertulang lingkaran dan persegi. Model *CFT circular* (MCFTC) dan *square* (MCFTS) adalah model struktur yang menggunakan kolom-kolom komposit beton dibungkus profil baja berongga atau *Hollow Structural Section* (HSS) lingkaran dan persegi.



Gambar 3. Penampang kolom untuk masing-masing model struktur

Dimensi kolom-kolom dibuat mengecil semakin ke atas, sehingga menjadi dua kelompok kolom yaitu kolom lantai I-III dan kolom lantai IV-V.

Profil baja yang digunakan sesuai dengan standar AISC seperti W dan HSS, dengan standar material sesuai ASTM A992 dan A618. Begitu juga dengan tulangan yang menggunakan material sesuai ASTM A615. Sedangkan material beton yang digunakan adalah beton normal standar ASTM C94 dengan kekuatan tekan 4000 psi. Pemodelan, analisis, dan desain menggunakan ETABS[®] dengan pembebanan sesuai PPIUG 1983 dan SNI 1727:2013, serta pembebanan gempa sesuai SNI 1726:2012. Preferensi desain berdasarkan SNI 1729:2015 atau AISC 360-10 dan ANSI/AISC 341-05 untuk material baja dan komposit baja beton.

Analisis statis non linier *Pushover* dilakukan dengan *software* SAP2000[®]. Pada *Load Case* non linier gravitasi (GRAVITY), struktur dibebani dengan beban gravitasi yang dikalikan dengan faktor beban sesuai dengan PPIUG 1983 yaitu, 1 untuk beban mati (Dead & Super Dead) dan 0,3 untuk beban hidup (Live). Beban yang diaplikasikan tidak ditingkatkan secara bertahap (*Full Load*) sehingga hasil analisis ini hanya berupa hasil akhir dari pembebanan gravitasi (*Final State Only*). Kondisi akhir dari analisis beban gravitasi non linier ini akan menjadi kondisi awal dalam analisis *Pushover*. Struktur dibebani dua jenis beban *Pushover*, yaitu PUSH X (beban dorong akibat peningkatan gaya lateral arah sumbu X) dan PUSH Y (beban dorong akibat peningkatan gaya lateral arah sumbu Y). Struktur yang dibebani beban *Pushover*, besar perpindahan atapnya dikontrol hingga setidaknya mencapai *target displacement*. Analisis ini merupakan lanjutan dari analisis statis non linier yang pertama (beban non linier gravitasi) dan karena beban lateral diaplikasikan secara bertahap maka hasil analisis ini tersedia dalam tahapan-tahapan pembebanan (*Multiple States*).

Sendi plastis ini biasanya terletak di ujung-ujung balok dan kolom karena bagian inilah yang menerima momen dan gaya geser yang paling besar. Pendefinisian sendi plastis pada kolom komposit dilakukan pada kolom baja yang dimodifikasi *section properties*-nya agar kekakuan dan kekuatannya sama dengan kolom komposit. *Property Modifiers* yang dilakukan pada kolom baja tersebut dengan SAP2000[®] berupa luas penampang aksial, luas penampang geser, konstanta torsi, inersia momen, dan massa atau berat.

Harga material struktur yang digunakan untuk menghitung harga struktur didasarkan pada harga material di suatu proyek yang sudah atau sedang berlangsung. Harga material baja yang digunakan adalah sebesar Rp19.550 per kg. Harga tersebut adalah harga yang digunakan CV. Dwi Tehnik sebagai pemenang pekerjaan Pemasangan Canopy Baja Drop Off, Pergola Kaca, Lounge & Bar proyek CY Marriot Seminyak Bali pada September 2013. Harga beton per m³ dan besi per kg yang digunakan adalah sebesar Rp1.033.433 dan Rp12.043. Harga-harga

tersebut digunakan oleh PT. Tunas Jaya Sanur sebagai kontraktor pelaksana proyek Commercial Strip Garuda Wisnu Kencana Bali pada September 2014. Sedangkan harga bekisting kolom yang digunakan adalah sebesar Rp128.000 per m². Harga ini digunakan oleh PT. Acset Indonusa, Tbk. di proyek Pembangunan Grand Mansion Apartemen Jakarta pada Mei 2016. Harga bekisting yang tercantum tidak spesifik untuk kolom persegi atau lingkaran. Oleh karena kesulitan mencari data, maka diambil asumsi bahwa harga per m² bekisting kolom lingkaran 50% lebih mahal dari harga per m² bekisting kolom persegi, yaitu menjadi Rp192.000.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Dimensi elemen struktur

Dimensi balok induk semua model adalah W14×36 untuk lantai I-IV dan W14×26 untuk lantai V. Sedangkan balok anak sebesar W10×15 dan W10×12 untuk lantai I-IV dan lantai V. Rasio interaksi aksial-lentur (rasio P-M) balok paling kecil adalah sebesar 0,525.

Untuk kolom, dengan rasio P-M paling kecil sebesar 0,7 didapat dimensi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Kolom-kolom pada model MS tidak memenuhi batasan tekuk lokal untuk elemen yang sangat daktail sesuai preferensi desain ketahanan terhadap gempa AISC 341-05 untuk sistem SRPMK.

Tabel 1. Dimensi kolom semua model beserta rasio P-M

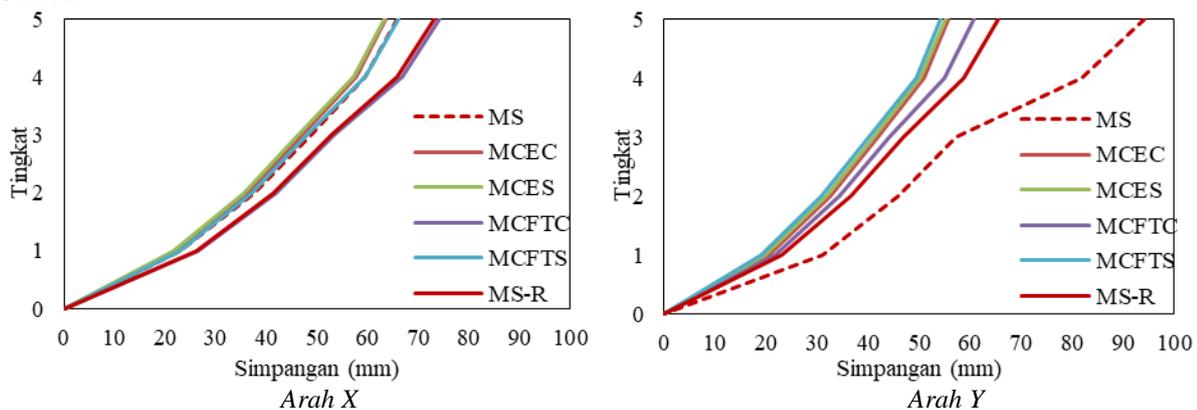
Model	Lantai	Kolom	Rasio P-M Terbesar			
			P	M _X	M _Y	Total
MS	IV-V	W12×45	0,224	0,139	0,441	0,804
	I-III	W14×90	0,257	0,102	0,360	0,719
MCEC	IV-V	W6×16 + Beton D=350 mm	0,048	0,453	0,288	0,790
	I-III	W10×45 + Beton D=450 mm	0,279	0,166	0,417	0,863
MCES	IV-V	W6×16 + Beton S=300 mm	0,051	0,484	0,316	0,851
	I-III	W10×45 + Beton S=400 mm	0,277	0,169	0,421	0,867
MCFTC	IV-V	HSS10×0,250 + Beton Pengisi	0,048	0,539	0,236	0,824
	I-III	HSS14×0,375 + Beton Pengisi	0,229	0,486	0,093	0,808
MCFTS	IV-V	HSS10×10×3/16 + Beton Pengisi	0,049	0,536	0,239	0,825
	I-III	HSS14×14×1/4 + Beton Pengisi	0,248	0,532	0,103	0,882

Rasio luas penampang baja pada kolom model komposit memenuhi ketentuan rasio minimum 1% dengan rasio paling kecil sebesar 3,2%.

4.2 Simpangan struktur

Simpangan elastis struktur dihitung pada arah X dan arah Y, akibat kombinasi beban mati, beban hidup, dan beban gempa arah X (Ex) maupun gempa arah Y (Ey). Besarnya gaya lateral tingkat adalah sama besar untuk semua model karena dilakukannya penyetaraan massa bangunan, yaitu sebesar 395 kN, 450 kN, 323 kN, 200 kN, dan 86 kN berturut-turut pada lantai V hingga lantai I. Simpangan arah Y pada puncak lantai model MS adalah yang paling besar, yaitu 94,1 mm. Namun, simpangan arah X-nya hanya sebesar 65,7 mm.

Perbedaan simpangan arah X dan Y model MS yang ekstrim disebabkan oleh perbandingan inersia momen kolom model MS arah X dengan arah Y yang timpang. Sehingga dilakukan perubahan orientasi sebesar 90° pada semua kolom as-1 dan 4 (selanjutnya disebut model MS-R) dan memberikan hasil simpangan yang ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Simpangan elastis struktur model MS-R dan model lainnya akibat D+L+E

Dari Gambar 4 dapat diamati simpangan model MS-R arah Y berkurang dan grafiknya mendekati grafik model-model lainnya. Dengan perubahan orientasi tersebut menyebabkan simpangan arah X menjadi lebih besar dibandingkan sebelum dilakukan perubahan orientasi (model MS). Simpangan arah Y model lainnya pada kisaran 54 mm sampai dengan 61 mm. Sedangkan simpangan arah X di puncak lantai model MCFTC adalah yang terbesar, yaitu sebesar 74,2 mm. Model-model lainnya berimpit dengan besar simpangan berkisar dari 63 mm sampai 66 mm.

Pemeriksaan simpangan antar lantai dilakukan untuk mengetahui apakah ada yang melebihi simpangan antar lantai ijin berdasarkan SNI 1726:2012 sebesar 2% tinggi lantai. Ketidakberaturan tingkat lunak juga diperiksa agar mengetahui apakah ada yang mengalami *soft story* dengan cara membandingkan kekakuan suatu lantai dengan lantai di atasnya melebihi 130% atau tidak. Pemeriksaan simpangan antar lantai ditampilkan pada Tabel 2 dan pemeriksaan ketidakberaturan tingkat lunak disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Simpangan antar lantai (Δ_I)

Lt. ke- <i>x</i>	Simpangan Antar Lantai (Δ_I) Akibat D+L+E (mm) dan Rasio Δ_I/h									
	MS-R		MCEC		MCES		MCFTC		MCFTS	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
5	40,2 (1,22%)	36,9 (1,12%)	32,5 (0,98%)	26,4 (0,80%)	33,6 (1,02%)	27,5 (0,83%)	40,2 (1,22%)	31,9 (0,97%)	35,2 (1,07%)	27,5 (0,83%)
4	72,1 (2,18%)	65,5 (1,98%)	58,3 (1,77%)	49,0 (1,48%)	59,4 (1,80%)	50,1 (1,52%)	74,3 (2,25%)	60,0 (1,82%)	63,3 (1,92%)	51,2 (1,55%)
3	63,8 (1,93%)	56,7 (1,72%)	59,4 (1,80%)	51,2 (1,55%)	59,4 (1,80%)	50,6 (1,53%)	64,4 (1,95%)	52,8 (1,60%)	60,5 (1,83%)	50,1 (1,52%)
2	83,1 (2,52%)	74,8 (2,27%)	77,6 (2,35%)	67,1 (2,03%)	76,5 (2,32%)	66,6 (2,02%)	84,2 (2,55%)	69,3 (2,10%)	78,7 (2,38%)	66,0 (2,00%)
1	143,6 (4,35%)	126,5 (3,83%)	121,6 (3,68%)	112,2 (3,40%)	118,8 (3,60%)	108,4 (3,28%)	145,2 (4,40%)	119,9 (3,63%)	125,4 (3,80%)	104,0 (3,15%)

Catatan: -Simpangan antar lantai ijin (Δ_a) = 66 mm, atau dinyatakan dalam rasio (Δ_a/h) = 2%

-Nilai yang dicetak tebal melampaui simpangan antar lantai ijin

Tabel 3. Perbandingan *drift* antar lantai

Lantai ke- <i>x</i>	h_s (m)	Perbandingan <i>Drift</i> Akibat D+L+E									
		MS-R		MCEC		MCES		MCFTC		MCFTS	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
5	3,3										
4	3,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	3,3	89%	87%	102%	104%	100%	101%	87%	88%	96%	98%
2	3,3	130%	132%	131%	131%	129%	132%	131%	131%	130%	132%
1	3,3	173%	169%	157%	167%	155%	163%	173%	173%	159%	158%

Catatan: -Perbandingan *drift* maksimum = 130%

-Nilai yang dicetak tebal melampaui perbandingan *drift* maksimum

Dari Tabel 2 dapat diamati lantai I dan II semua model melebihi simpangan antar lantai ijin. Simpangan antar lantai IV, yang mana mengalami pengecilan dimensi kolom, model MS-R dan MCFTC juga melebihi 66 mm. Dapat diamati juga dari Tabel 3, lantai I semua model pada kedua arah mengalami *soft story*. Hal ini akibat dari perletakan sendi yang menyebabkan simpangan pada lantai tersebut sangat besar dan membuat kekakuan lantai I menjadi lemah. Perbandingan tidak dilakukan antara dua lantai teratas (lantai IV dengan V) seperti yang ditentukan pada SNI 1726:2012, sehingga pada tabel diberi tanda strip (“-”).

4.3 Simpangan struktur dengan bresing-X di lantai dasar dan pembesaran kolom lantai IV-V

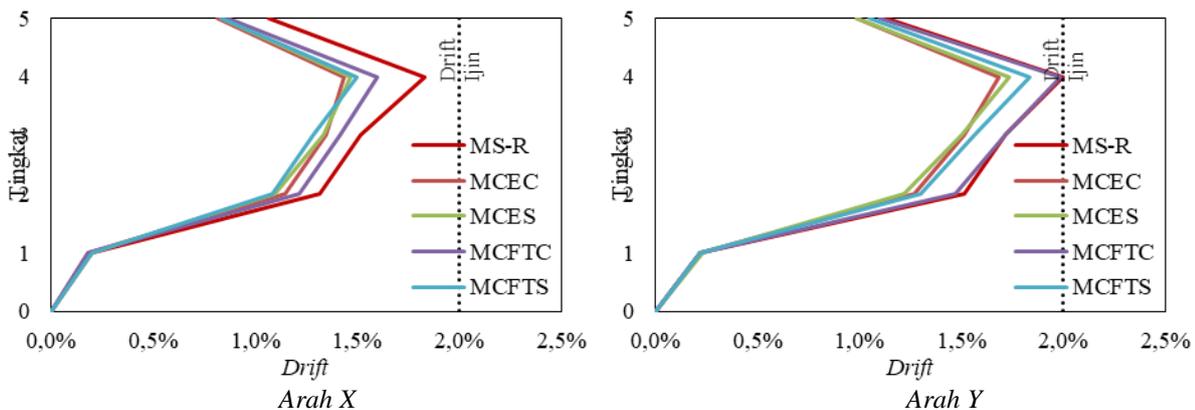
Posisi pemasangan bresing semua model pada arah X dilakukan pada lantai I portal melintang as-A, D, G, dan J. Pada arah Y, pemasangan dilakukan pada portal memanjang as-1 dan 4. Tipe bresing yang dipasang pada kedua arah adalah tipe X. Bresing-X tersebut terdiri dari satu batang diagonal utuh dan satu batang diagonal lainnya yang terbagi dua sehingga memungkinkan tersambung di tengah bentang untuk mengurangi panjang tekuk. Hubungan bresing, baik pada balok-kolom dan pada batang yang terbagi dua di titik pertemuan antar batang, dibuat dapat berputar sudut. Dimensi bresing-X yang digunakan adalah W14x61.

Selain akibat perletakan sendi, pelemahan kekakuan lantai juga terjadi akibat pengecilan dimensi kolom pada lantai IV seperti yang terjadi pada model MS-R dan MCFTC. Penanggulangan simpangan antar lantai melampaui ijin yang hanya terjadi pada model MS-R dan MCFTC, dilakukan dengan pembesaran dimensi

kolom. Pada model MS-R, kolom lantai IV-V yang semula menggunakan profil W12×45 dicoba diganti menjadi profil W12×50. Sedangkan pada model MCFTC, kolom lantai IV-V dengan profil HSS10×10 yang semula dengan tebal 0,250 inci dicoba diganti menjadi tebal 0,375 inci. Pembesaran dimensi dilakukan secara *trial and error* mengganti profil baja secara bertahap dengan yang lebih besar sesuai dengan yang tersedia pada tabel profil AISC-14.

Penyetaraan massa bangunan kembali dilakukan pada kedua model tersebut karena adanya pembesaran dimensi kolom. Penanggulangan dengan pembesaran dimensi kolom lantai IV-V model MS-R dan MCFTC tersebut menghindari pemasangan bresing yang hingga mencapai lantai V. Pemasangan bresing hanya pada lantai IV saja tentu mengakibatkan *soft story* pada lantai III karena kekakuan lantai IV secara ekstrim meningkat dibanding lantai III yang tanpa bresing.

Hasil analisis kembali berupa simpangan antar lantai per tinggi lantai (*drift*) model dengan penambahan bresing dan pembesaran kolom ditampilkan berupa grafik ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. *Drift* struktur semua model dengan penambahan bresing dan pembesaran kolom akibat D+L+E

Dengan penambahan bresing-X pada lantai dasar semua model dan pembesaran kolom lantai IV-V model MS-R dan MCFTC mampu mengatasi permasalahan simpangan antar lantai yang melewati ijin serta tidak ada yang mengalami *soft story*.

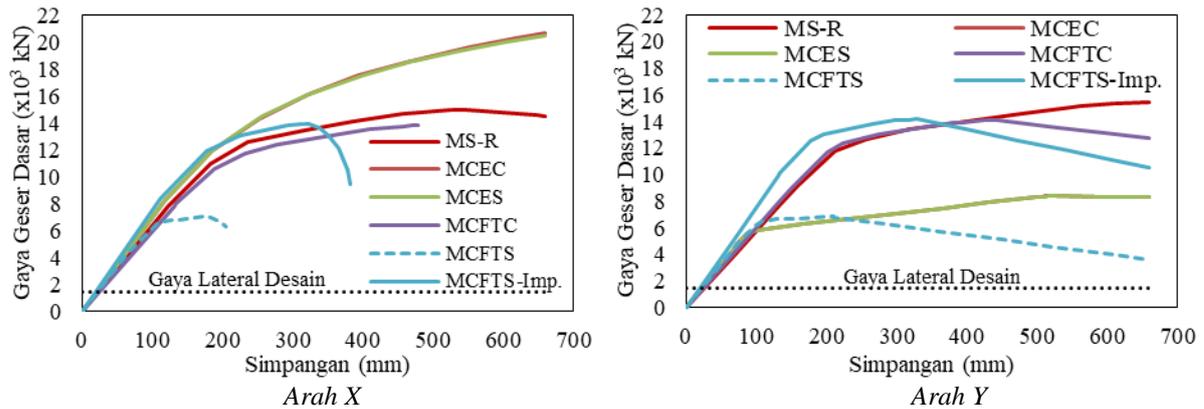
4.4 Kinerja struktur

Model-model yang dilakukan analisis kinerja struktur adalah model yang memenuhi ketentuan simpangan antar lantai dan perbandingan *drift*. Model-model tersebut adalah model dengan penambahan bresing (MCEC, MCES, MCFTS) dan model dengan penambahan bresing serta pembesaran kolom (MS-R dan MCFTC).

Pendefinisian sendi plastis pada bresing yaitu menggunakan sendi plastis dengan *degree of freedom* Axial-P dan ditempatkan di tengah bentang antara titik persilangan dan hubungan dengan kolom. *Section properties* dari kolom baja pengganti dibandingkan dengan *section properties* dari kolom komposit yang digantikannya. Selanjutnya dari perbandingan tersebut didapatkan rasio yang merupakan *Property Modifiers*.

Pemodelan sendi plastis pada kolom komposit dilakukan dengan menggantikan terlebih dahulu kolom komposit dengan kolom baja. Kemudian kolom baja pengganti tersebut dimodelkan sendi plastis. Kolom baja pengganti yang digunakan untuk model komposit CE adalah kolom yang sama pada model MS. Sedangkan kolom baja pengganti yang digunakan untuk model komposit MCFTS adalah profil baja HSS dari kolom kompositnya. Pada model MCFTC, kolom baja pengganti yang digunakan bukan profil baja HSS lingkaran, melainkan profil baja yang sama dengan kolom pengganti pada model MCFTS karena tidak tersedianya *acceptance criteria* untuk penampang baja lingkaran.

Hasil dari analisis statis non linier berupa kurva yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan atap (kurva *Pushover*) semua model akibat gaya dorong arah X (PUSH X) dan gaya dorong arah Y (PUSH Y) ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva *Pushover* semua model arah X dan Y

Gambar 7 menunjukkan pada *Pushover* arah X, model MCEC dan MCES mampu menerima beban dorong paling besar sebesar 20435 kN dan 20435 kN pada perpindahan atap sebesar 660 mm. Kurva *Pushover* MCEC dan MCES terlihat berimpit. Model MS-R mampu menerima beban dorong maksimum sebesar 14927 kN dengan perpindahan atap sebesar 532 mm. Disusul oleh model MCFTC dengan beban dorong maksimum sebesar 13783 kN pada perpindahan atap sebesar 479 mm. Kurva *Pushover* model MCFTS adalah yang paling buruk dengan kemampuan maksimum menahan beban dorong sebesar 7010 kN pada perpindahan atap hanya sebesar 178 mm. Pada arah Y, beban dorong maksimum yang mampu diterima model MS-R adalah yang terbesar yaitu 15474 kN pada perpindahan atap sebesar 660 mm. Kurva model MCFTC terlihat berimpit dengan kurva MS-R pada kondisi elastis, namun kapasitas beban dorongnya tidak mampu menyamai model MS-R pada kondisi inelastis. Beban dorong maksimum model MCEC dan MCES hampir sama sebesar 8358 kN dan 8354 kN pada perpindahan atap sebesar 527 mm. Kurva *Pushover* model MCFTS arah Y juga yang paling buruk dengan kemampuan maksimum menahan beban dorong sebesar 6816 kN pada perpindahan atap hanya sebesar 206 mm. Gaya lateral desain sebesar 1454 kN ditampilkan pada kurva sebagai perbandingan.

Hasil evaluasi kinerja struktur berupa level kinerja ditentukan saat struktur mencapai perpindahan target berdasarkan *Coefficient Method* FEMA 356. Evaluasi kinerja struktur semua model arah X dan Y ditampilkan sebagai berikut.

Tabel 4. Perbandingan evaluasi kinerja struktur semua model arah X dan Y

	PUSH X					PUSH Y				
	MS-R	MCEC	MCES	MCFTC	MCFTS	MS-R	MCEC	MCES	MCFTC	MCFTS
V_T (kN)	10352	10486	10469	10409	6899	11015	6298	6278	11705	6700
δ_T (mm)	171	159	159	186	157	198	173	173	203	159
Sendi	2	1	2	21	25	121	80	80	57	48
Plastis	IO-LS	IO-LS	IO-LS	IO-LS	C-D	B-IO	IO-LS	IO-LS	IO-LS	C-D
Terbentuk										
Level Kinerja	IO	IO	IO	IO	C	O	IO	IO	IO	C

Semua model kecuali MCFTS memiliki level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) yang ditunjukkan dengan terbentuknya sejumlah sendi plastis dengan kategori IO pada saat struktur mencapai perpindahan target. Level kinerja model MS-R pada arah Y bahkan masih *Operational* (O), namun dianggap memiliki level kinerja IO. Model MCFTS memiliki level kinerja *Collapse* (C) baik pada arah X dan Y.

Hasil analisis *Pushover* dari model MCFTS menunjukkan hasil yang tidak baik. Pada kurva *Pushover*, dapat diamati kapasitasnya yang paling rendah dan memiliki level kinerja C. Hal ini diakibatkan oleh ketebalan dinding profil baja HSS yang tipis. Untuk mencapai hasil kinerja yang lebih baik, perlu dilakukan pembesaran kolom, yaitu dengan mempertebal dinding profil baja HSS. Ketebalan profil pada kolom lantai I-III yang semula 1/4 inci dicoba dengan ketebalan yang sama dengan pada model MCFTC yaitu 3/8 inci. Begitu juga dengan ketebalan profil pada kolom lantai IV-V yang semula 3/16 inci juga dipertebal menjadi 1/2 inci. Pembesaran dimensi tersebut juga dilakukan secara bertahap dari profil yang ada pada AISC-14 hingga didapat hasil yang baik. Hasil-hasil analisis berupa kurva *Pushover* dan level kinerja untuk model MCFTS dengan pembesaran kolom (selanjutnya disebut MCFTS-Improved) dan perbandingannya terhadap hasil-hasil dari model lainnya ditunjukkan pada Gambar 7.

Dapat diamati bahwa pembesaran kolom dapat meningkatkan kapasitas model MCFTS-Improved secara signifikan. Selain itu, kekakuan juga meningkat dilihat dari kemiringan kurva pada kondisi elastis yang lebih

terjal. Bahkan pada arah Y, kekakuannya adalah yang paling besar. Level kinerja model MCFTS-Improved juga membaik menjadi IO dengan perpindahan target sebesar 165 mm pada arah X dan 184 mm pada arah Y.

Pada saat simpangan struktur mencapai perpindahan target, sendi-sendi plastis terbentuk hanya pada balok dan kolom. Belum terjadi kelelahan pada bresing di semua model.

4.5 Harga struktur

Volume material yang dibandingkan adalah banyaknya kilogram (kg) baja, volume (m³) beton, kilogram (kg) tulangan, dan luasan (m²) bekisting kolom yang diperlukan dalam satu gedung. Dengan menggunakan harga baja Rp19.550/kg, harga beton Rp1.033.433/m³, harga besi tulangan Rp12.043/kg, dan harga bekisting kolom Rp128.000/m² untuk kolom persegi serta Rp192.000/m² untuk kolom lingkaran, maka harga struktur setiap model adalah sebagai berikut ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan biaya struktur semua model (dalam juta Rupiah)

Model	Baja	Beton	Tulangan	Bekisting	Total
MS-R	3.693,31	-	-	-	3.693,31
MCEC	2.918,84	86,89	100,46	163,22	3.267,41
MCES	2.918,84	85,59	100,46	121,65	3.224,54
MCFTC	3.138,84	48,64	-	-	3.186,48
MCFTS-Improved	3.582,09	60,53	-	-	3.642,63

Struktur paling mahal adalah model MS-R yaitu 3,69 milyar Rupiah. Disusul oleh model MCFTS-Improved sebesar 3,64 milyar Rupiah. Termahal ketiga dan keempat adalah model MCEC dan MCES dengan nilai masing-masing 3,27 milyar dan 3,23 milyar Rupiah. Sedangkan harga struktur model MCFTC adalah 3,19 milyar Rupiah. Sebelum perbaikan kinerja, struktur MCFTS adalah yang termurah yaitu sebesar 3,02 milyar Rupiah.

Apabila dinyatakan dalam perbandingan dengan harga model MS-R sebagai acuan, maka perbandingan harga model MS-R, MCEC, MCES, MCFTC, dan MCFTS-Improved adalah 1:0,88:0,87:0,86:0,99. Harga-harga tersebut tidak termasuk struktur pelat dan pondasi serta biaya *fireproofing*.

5. KESIMPULAN

Pada studi ini telah dianalisis dan dievaluasi kinerja dari struktur SRPMK menggunakan kolom baja pada model MS, kolom komposit *Concrete Encased* (CE) lingkaran pada model MCEC dan persegi pada model MCES, dan kolom komposit *Concrete Filled Tube* (CFT) lingkaran pada model MCFTC dan persegi pada model MCFTS. Dari hasil analisis dapat disimpulkan:

1. Semua model tidak memenuhi *drift* ijin sebesar 2% dengan rasio P-M kolom sebesar 0,79-0,88. Diperlukan perubahan orientasi kolom (MS-R), pemasangan bresing, dan pembesaran dimensi kolom.
2. Model MCFTS memiliki level kinerja C, sedangkan yang lainnya adalah IO. Perbaikan kinerja dilakukan dengan memperbesar dimensi (MCFTS-Improved) sehingga didapat level kinerja IO.
3. Harga struktur dari yang termahal hingga yang termurah adalah model MS-R, MCFTS-Improved, MCEC, MCES, dan MCFTC dengan perbandingan 1:0,99:0,88:0,87:0,86.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction, 2011. *Steel Construction Manual*. 14th ed. Chicago(Illinois): AISC.
- American Society of Civil Engineers, 2000. *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington D.C.: FEMA.
- American Society of Civil Engineers, 2014. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston(Virginia): ASCE.
- Badan Standardisasi Nasional, 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2012)*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional, 2015. *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (SNI 1729:2015)*. Jakarta: BSN.
- Building Seismic Safety Council, 1997. *NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273)*. Washington D.C.: FEMA.
- California Seismic Safety Commission, 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)*. Redwood City: ATC.
- Computers and Structures, Inc., 2017. *Structural Software | Computers and Structures, Inc.* [Online] Available at: <https://wiki.csiamerica.com> [Accessed 30 January 2017].

- Dewobroto, W., 2005. *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover*. Semarang, Unika Soegijapranata.
- Liang, Q. Q., 2015. *Analysis and Design of Steel and Composite Structures*. Boca Raton(Florida): CRC Press.
- Nakashima, H., 2015. *Steel Construction Technologies in Japan*. Tokyo: HIDA Japan.
- Schneider, S. P., Kramer, D. R. & Sarkkinen, D. L., 2004. *The Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column Frames*. Vancouver, 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- Susantha, K. A. S., Ge, H. & Usami, T., 2001. Uniaxial Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Various Shaped Steel Tubes. *Elsevier Engineering Structures*, Volume 23, pp. 1331-1347.
- Wibowo, Purwanto, E. & Yanto, D., 2010. Menentukan Level Kinerja Struktur Beton Bertulang Pasca Gempa. *Media Teknik Sipil*, pp. 49-54.