

ANALISIS STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT MENGUNAKAN KOMBINASI SISTEM STRUKTUR *FRAME TUBE* DAN *WAFFLE SLAB*

Faiz Sulthan¹, Hanafiah¹, dan Yakni Idris¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Palembang
E-mail: faizsulthan08@yahoo.com

Abstrak. Fungsi utama dari sistem struktur adalah untuk memikul secara aman dan efektif beban yang bekerja pada bangunan, baik itu beban vertikal ataupun beban horisontal. Untuk mengurangi lendutan vertikal akibat beban vertikal pada struktur gedung bentang lebar digunakanlah sistem struktur lantai dengan balok grid yang disebut juga dengan struktur lantai pelat berusuk (*waffle slab*), dan untuk mengurangi lendutan horisontal atau simpangan lateral pada struktur gedung bertingkat digunakan sistem struktur yang bekerja untuk menahan gaya lateral, salah satunya adalah sistem struktur rangka tabung (*frame tube*). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja struktur gedung bertingkat berdasarkan nilai simpangan lateral, dan *story drift* pada kombinasi sistem struktur *frame tube* dan *waffle slab*. Model gedung yang menjadi objek penelitian adalah gedung bertingkat dengan struktur beton bertulang yang memiliki 8 lantai dengan tinggi tiap lantai sama. Model gedung terdiri dari 4 model, yaitu model 1 adalah sistem rangka biasa dengan *waffle slab* tanpa balok pengikat, model 2 adalah sistem *frame tube* dengan *waffle slab* tanpa balok pengikat, model 3 adalah sistem rangka biasa dengan *waffle slab* dan balok pengikat, dan model 4 adalah sistem *frame tube* dengan *waffle slab* dan balok pengikat. Hasil penelitian ini antara lain; penggunaan *frame tube* dapat mengurangi nilai simpangan lateral pada sistem *waffle slab* yaitu dari nilai simpangan lateral maksimum sebesar 128,90 mm menjadi 81,53 mm dengan persentase pengurangan sebesar 36,7%. Penggunaan kombinasi *frame tube* dengan balok pengikat pada sistem *waffle slab* dapat mengurangi simpangan lateral maksimum sebesar 128,90 mm menjadi 61,54 mm dengan persentase pengurangan yaitu sebesar 52,3%.

Kata kunci: *frame tube*, gedung bertingkat, simpangan lateral, *story drift*, *waffle slab*

I. PENDAHULUAN

Sistem struktur adalah penggabungan berbagai elemen struktur secara tiga dimensi yang cukup rumit. Fungsi utama dari sistem struktur adalah untuk memikul secara aman dan efektif beban yang bekerja pada bangunan, baik itu beban vertikal ataupun beban horisontal. Untuk mengurangi lendutan vertikal akibat beban vertikal pada struktur gedung bentang lebar digunakanlah sistem struktur lantai dengan balok grid yang disebut juga dengan struktur lantai pelat berusuk (*waffle slab*), dan untuk mengurangi lendutan horisontal atau simpangan lateral pada struktur gedung bertingkat digunakan sistem struktur yang bekerja untuk menahan gaya lateral, salah satunya adalah menggunakan sistem struktur rangka tabung (*frame tube*).

Sistem *waffle slab* adalah sistem pelat lantai yang ditopang balok bersilangan dengan jarak yang relatif rapat yang bekerja secara monolit. Sistem ini dimaksudkan untuk mengurangi berat sendiri pelat, sehingga lendutan dari pelat yang besar dapat dikurangi. Sistem ini dinilai efisien untuk bentangan besar dan digunakan untuk meningkatkan kekakuan

pelat.

Sistem struktur *tube* merupakan salah satu sistem struktur untuk bangunan bertingkat tinggi yang dikembangkan oleh Fazlur Rahman Khan tahun 1960. Sistem ini terdiri dari sistem struktur *frame tube* dan sistem struktur *tube in tube* (Schueller, 1999).

Penelitian Satriadi (2013) mengenai perbandingan simpangan lateral antara penggunaan sistem *waffle slab* dengan balok grid arah sejajar dan grid arah diagonal didapatkan hasil bahwa balok grid arah sejajar dapat meningkatkan simpangan lateral pada struktur gedung bertingkat. Simpangan lateral yang besar menjadikan sistem struktur *waffle slab* tidak relevan untuk bangunan bertingkat yang harus memenuhi batas layan dan ultimit kinerja gedung. Untuk memenuhi kriteria kinerja gedung, umumnya sistem *waffle slab* pada gedung rangka biasa menggunakan dimensi kolom yang cukup besar sehingga dalam segi material bersifat boros.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini membahas apakah efektif penggunaan sistem struktur *frame tube* untuk mengurangi simpangan lateral pada sistem *waffle slab* bila dibandingkan dengan sistem rangka biasa dengan membandingkan nilai simpangan

lateral antara sistem *frame tube* dan rangka biasa pada kombinasi sistem *waffle slab*.

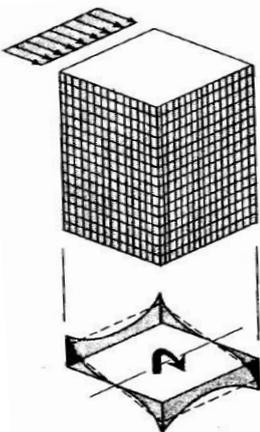
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Struktur Frame Tube

Sistem struktur *frame tube* dapat didefinisikan sebagai suatu sistem struktur yang berperilaku sebagai suatu tabung kosong. Dinding tabung terbuat dari kolom yang berjarak sangat rapat di sekeliling bangunan yang diikat dengan balok pengikat yang tinggi. Tampak struktur fasade terlihat sebagai dinding yang dilubangi. Diasumsikan bahwa kolom bagian dalam hanya berfungsi untuk menahan beban akibat berat sendiri, kemampuan untuk menahan gaya lateral diabaikan.

Lantai dianggap sebagai rigid diafragma dan diasumsikan untuk mendistribusikan gaya lateral ke komponen penahan gaya gaya lateral sesuai dengan kekakuannya (Schueller, 1999).

Perancangan sistem *frame tube* sangat ideal apabila dinding eksterior merupakan suatu kesatuan yang reaksinya terhadap beban lateral mengikuti lentur kantilever murni. Apabila demikian, maka semua kolom yang merupakan bagian dari tabung akan mengalami tarikan aksial atau tekan. Perilaku tabung sebenarnya adalah di antara kantilever murni dengan rangka murni. Sisi tabung yang sejajar dengan arah datang angin akan cenderung berlaku sebagai rangka *multitrave* yang independen dengan adanya fleksibilitas dari balok pengikat.



Gambar 1. Distribusi tegangan pada bangunan struktur *frame tube* (Schueller, 1999)

Dengan adanya fleksibilitas dari balok pengikat maka dihasilkan tekuk pada rangka karena gaya geser yang dinamakan *shear lag*, sehingga lentur terjadi pada kolom dan balok. Perilaku ini yang merupakan ciri khas rangka kaku. Pengaruh gaya geser atau *shear lag* pada aksi tabung mengakibatkan penyebaran tekanan nonlinear sepanjang kolom sisi luar. Kolom di sudut bangunan dipaksa untuk memikul beban yang lebih besar dari pada kolom diantara sudut. Selanjutnya

defleksi total dari bangunan tidak lagi berupa suatu balok kantilever karena deformasi akibat geser menjadi lebih kuat (Schueller, 1999).

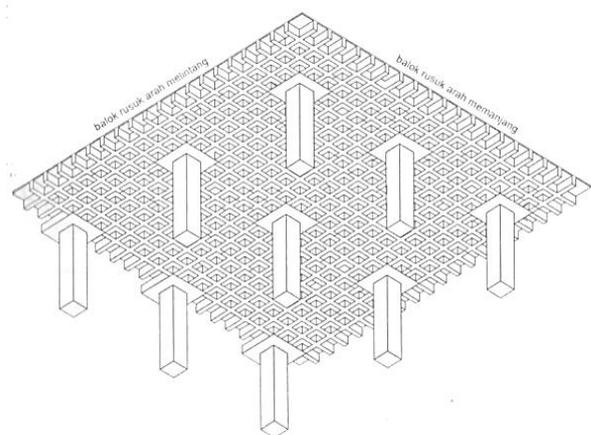
Permadi (2003) menyimpulkan reaksi yang terjadi pada sistem struktur *frame tube* akibat gaya luar yang bekerja adalah sama dengan penggabungan antara reaksi yang terjadi pada sistem struktur *rigid frame* ditambah dengan reaksi yang terjadi pada sistem struktur dinding geser. Deformasi yang terjadi secara keseluruhan adalah juga gabungan dari deformasi yang terjadi pada *rigid frame* ditambah deformasi pada dinding geser. Penggabungan ini membuat bangunan memiliki kestabilan yang lebih tinggi dari pada kedua sistem struktur tersebut berdiri sendiri, karena terjadinya tegangan yang saling menyeimbangkan.

Struktur *tube in tube* adalah kombinasi dari sistem *frame tube* dengan penambahan kekakuan bagian dalam menggunakan kolom interior atau dinding geser. Peningkatan kekakuan pada bagian inti, membuat struktur lantai akan mengikat tabung interior bersama tabung eksterior dan berlaku sebagai satu kesatuan terhadap gaya-gaya lateral.

B. Sistem Waffle Slab

Sistem *waffle slab* atau sistem pelat berusuk yang juga dinamakan pelat *joist* dua arah adalah bentuk pelat lantai yang unik, yang direncanakan bagi bentang lantai 7,50-12,50 m. Pada bentang yang besar, ketebalan lantai yang perlu menyalurkan beban vertikal ke kolom melebihi kapasitas lentur pelat. Dengan demikian, beton ditengah panel tidak digunakan secara efisien (Nasution, 2009).

Untuk meringankan bobot lantai, mengurangi momen lantai, dan menghemat bahan, pelat ditengah panel diganti dengan rusuk dua arah atau balok dua arah, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. *Waffle slab* (Nasution, 2009)

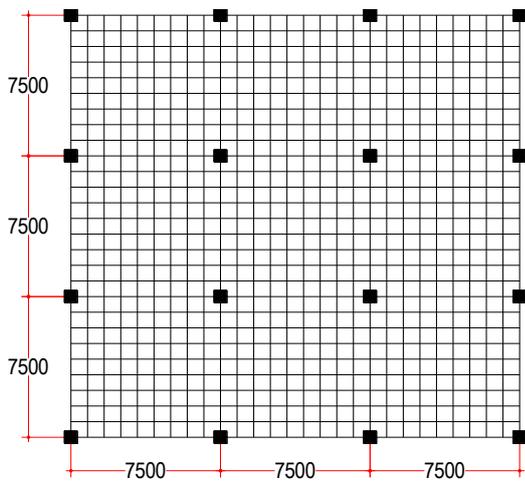
Waffle slab memiliki karakteristik pelat yang terdiri dari rusuk-rusuk yang tersusun sedemikian rupa serta dapat dimodelkan sebagai kumpulan dari balok T yang disusun. Sistem *waffle slab* dikaji sebagai sistem pelat dua arah karena memiliki karakteristik yang sama dengan sistem pelat dua arah konvensional.

III. METODOLOGI PENELITIAN

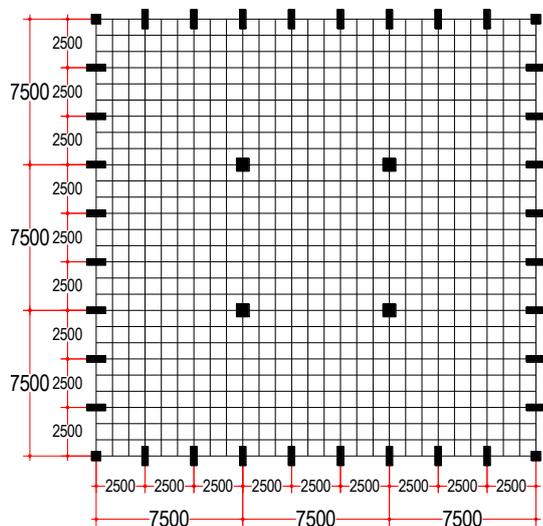
A. Objek Penelitian

Model gedung yang menjadi objek penelitian adalah gedung bertingkat dengan struktur beton bertulang yang memiliki 8 lantai dengan tinggi tiap lantai sama, yaitu 4 m dan difungsikan sebagai gedung pertemuan. Lokasi rencana gedung adalah di Kota Palembang Provinsi Sumatera Selatan. Data seismik untuk beban gempa dan data beban angin mengacu pada lokasi tersebut.

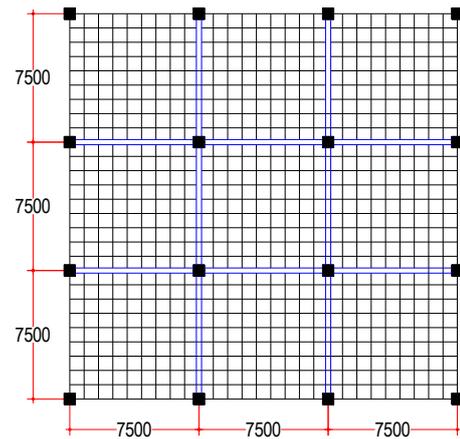
Model gedung terdiri dari 4 model, yaitu model 1 adalah sistem rangka biasa dengan *waffle slab* tanpa balok pengikat, model 2 adalah sistem *frame tube* dengan *waffle slab* tanpa balok pengikat, model 3 adalah sistem rangka biasa dengan *waffle slab* dan balok pengikat, dan model 4 adalah sistem *frame tube* dengan *waffle slab* dan balok pengikat. Gambar denah model bangunan dapat dilihat pada Gambar 3 sampai 6, dan gambar portal 2D nya pada Gambar 7.



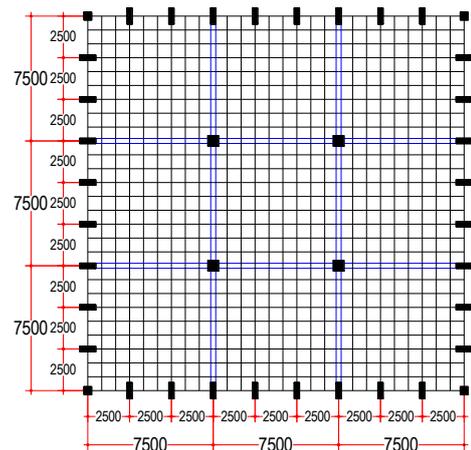
Gambar 3. Model 1 sistem rangka biasa dengan *waffle slab* tanpa balok pengikat



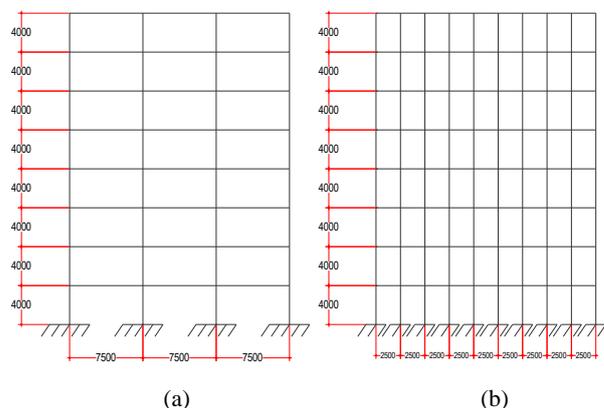
Gambar 4. Model 2 sistem *frame tube* dengan *waffle slab* tanpa balok pengikat



Gambar 5. Model 3 sistem rangka biasa dengan *waffle slab* dan balok pengikat



Gambar 6. Model 4 sistem *frame tube* dengan *waffle slab* dan balok pengikat



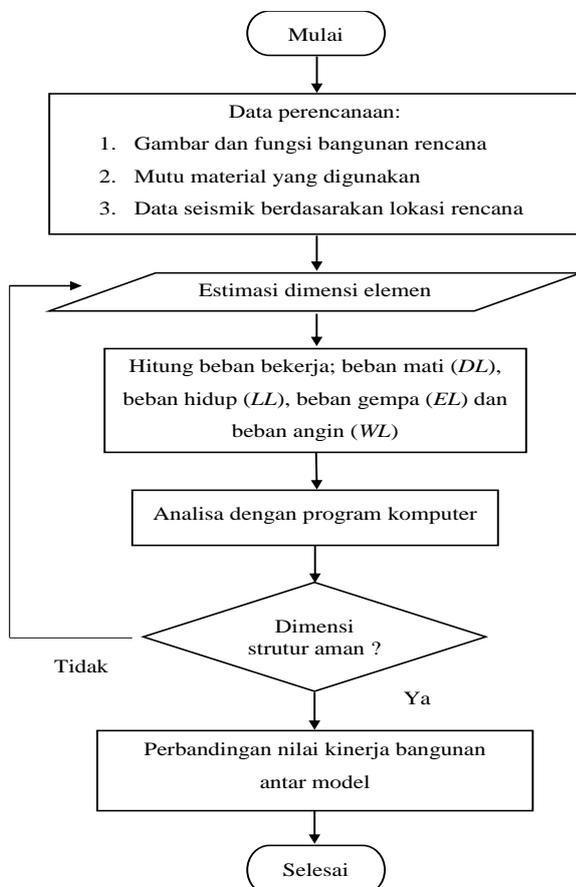
Gambar 7. Portal 2D model gedung sistem rangka biasa (a), portal 2D model gedung sistem *frame tube* (kanan) (b)

Data primer diolah secara manual untuk dilakukan perhitungan estimasi awal dimensi elemen struktur, dan beban yang bekerja pada struktur. Dimensi elemen struktur dikontrol terhadap kinerja bangunan batas layan maupun ultimit sehingga didapatkan dimensi yang memenuhi kriteria tersebut.

Analisis struktur setiap model gedung dihitung dengan bantuan program analisa struktur. Hasil yang diperoleh dari analisis program analisa struktur ini antara lain adalah nilai gaya dalam elemen struktur dan nilai simpangan lateral setiap model gedung. Nilai simpangan lateral dihitung untuk mendapatkan nilai simpangan lateral antar lantai (*story drift*). Nilai simpangan lateral maksimum dan simpangan lateral antar lantai (*story drift*) setiap model gedung dibandingkan, dan hasil perbandingan dari setiap model tersebut menunjukkan model gedung mana yang lebih elastis atau lebih kaku.

Peraturan pembebanan dan perhitungan struktur beton pada penelitian ini menggunakan Standar Nasional Indonesia, yaitu SNI-1726-2012 untuk perhitungan beban gempa, SNI-1727-2013 untuk perhitungan beban angin, dan SNI-2847-2013 untuk perhitungan struktur beton bertulang.

Penelitian ini tidak menghitung struktur tangga, hubungan balok kolom, tidak menganalisa perilaku bangunan terhadap pondasi, dan tidak menghitung rencana anggaran biaya. Alur dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram alir metodologi penelitian

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Data Perencanaan

Analisis struktur gedung bertingkat menggunakan

sistem struktur *frame tube* dan *waffle slab* ini terdiri dari 4 model gedung struktur beton bertulang dengan data perencanaan sebagai berikut:

Tipe gedung	: Gedung pertemuan
Jumlah lantai	: 8 lantai
Tinggi total gedung	: 32 m
Panjang gedung	: 22,5 m
Lebar gedung	: 22,5 m
Lokasi gedung	: Kota Palembang
Mutu beton ($f'c$)	: 30 MPa
Mutu tulangan baja utama (f_y)	: 420 MPa
Mutu tulangan baja sengkang (f_y)	: 280 MPa

B. Preliminary Design

Perhitungan dimensi elemen struktur model gedung rencana dihitung berdasarkan peraturan SNI 2847-2013 yang mengatur mengenai struktur beton bertulang. Elemen struktur yang didesain berupa dimensi kolom, balok pengikat, dan *waffle slab*. Adapun rekapitulasi dimensi elemen struktur tiap model untuk dianalisis dapat dilihat pada Tabel 1 sampai Tabel 4.

Tabel 1. Dimensi elemen struktur model 1

Elemen struktur	Dimensi
Kolom interior	850 mm x 850 mm
Kolom eksterior	850 mm x 850 mm
Balok rusuk (<i>joist</i>)	250 mm x 400 mm
Pelat lantai	90 mm

Tabel 2. Dimensi elemen struktur model 2

Elemen struktur	Dimensi
Kolom interior	850 mm x 850 mm
Kolom eksterior perimeter	300 mm x 750 mm
Kolom eksterior ujung	474,34 mm x 474,34 mm
Balok rusuk (<i>joist</i>)	250 mm x 400 mm
Pelat lantai	90 mm

Tabel 3. Dimensi elemen struktur model 3

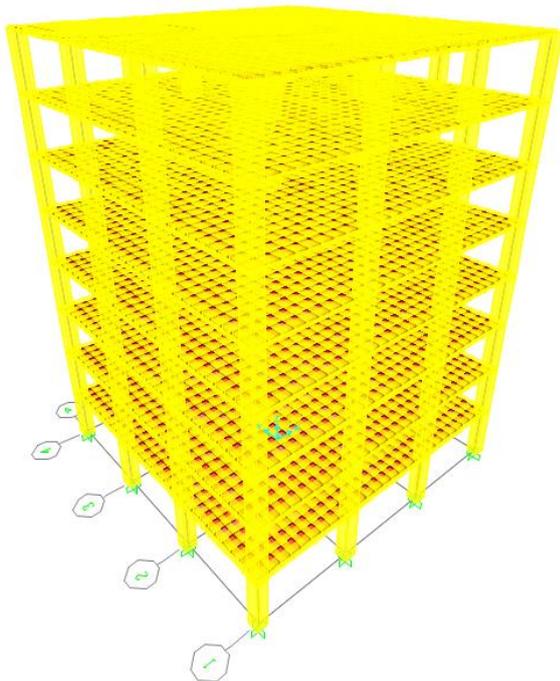
Elemen struktur	Dimensi
Kolom interior	850 mm x 850 mm
Kolom eksterior	850 mm x 850 mm
Balok pengikat	300 mm x 500 mm
Balok rusuk (<i>joist</i>)	250 mm x 400 mm
Pelat lantai	90 mm

Tabel 4. Dimensi elemen struktur model 4

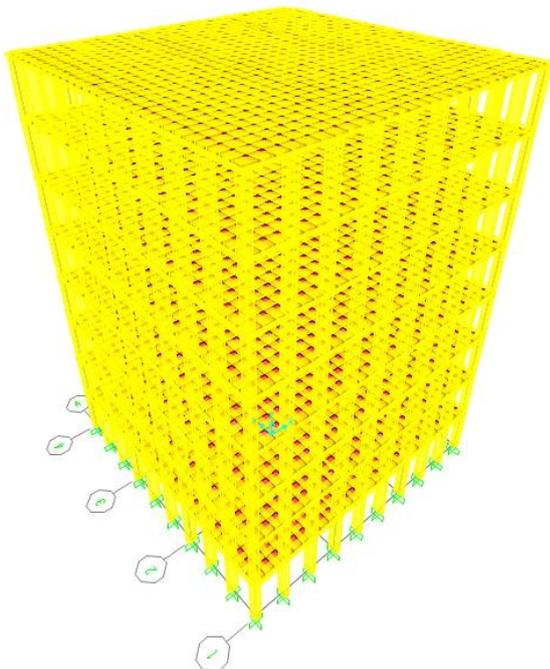
Elemen struktur	Dimensi
Kolom interior	850 mm x 850 mm
Kolom eksterior perimeter	300 mm x 750 mm
Kolom eksterior ujung	474,34 mm x 474,34 mm
Balok pengikat	300 mm x 500 mm
Balok rusuk (<i>joist</i>)	250 mm x 400 mm
Pelat lantai	90 mm

C. Pemodelan Struktur

Pemodelan dan analisis struktur model gedung dilakukan menggunakan program Analisa struktur komputer berdasarkan data perencanaan dan hasil dari *preliminary design* serta perhitungan pembebanan yang telah dilakukan. Jenis rangka gedung pada model yang dianalisis terdiri dari rangka biasa dan *frame tube*. Pemodelan struktur rangka biasa dan *frame tube* dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10.

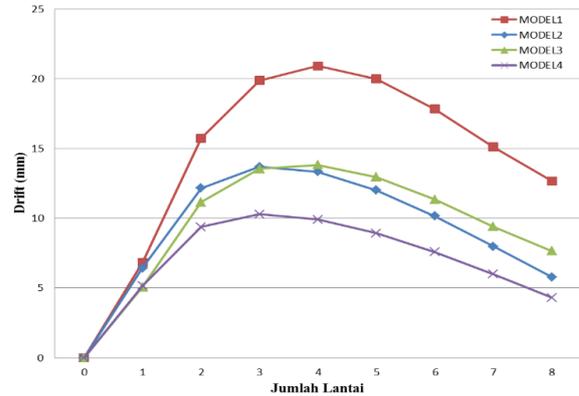


Gambar 9. Pemodelan struktur rangka biasa



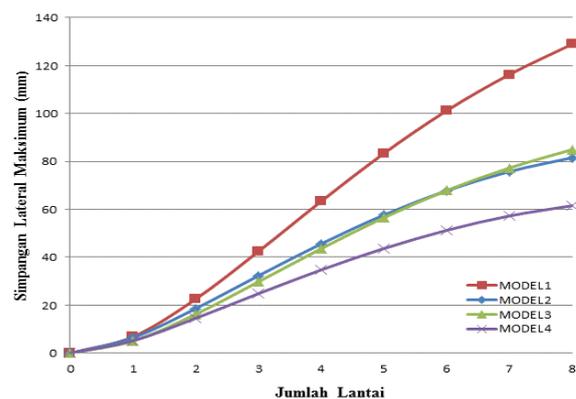
D. Analisis Kinerja Struktur Gedung

Berdasarkan analisis program analisa struktur komputer didapatkan nilai simpangan lateral per lantai yang kemudian dihitung nilai *drift* untuk selanjutnya dianalisis berdasarkan kinerja batas layan dan batas ultimit. Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 11 dan 12.



Gambar 11. Grafik perbandingan *story drift*

Pada Gambar 11 diketahui bahwa nilai kinerja struktur terelastis adalah pada gedung model 1 dengan *story drift* maksimum sebesar 20,91 mm, kemudian gedung model 2 sebesar 13,69 mm, model 3 sebesar 13,83 mm, dan model gedung yang paling kaku adalah gedung model 4 dengan *story drift* sebesar 10,28 mm.



Gambar 12. Grafik perbandingan simpangan lateral maksimum

Berdasarkan Gambar 12 diketahui bahwa nilai simpangan lateral maksimum terbesar adalah pada model 1 sebesar 128,90 mm, kemudian model 3 sebesar 84,92 mm, model 2 sebesar 81,52 mm, dan nilai simpangan lateral maksimum terkecil adalah pada model 4 sebesar 61,54 mm.

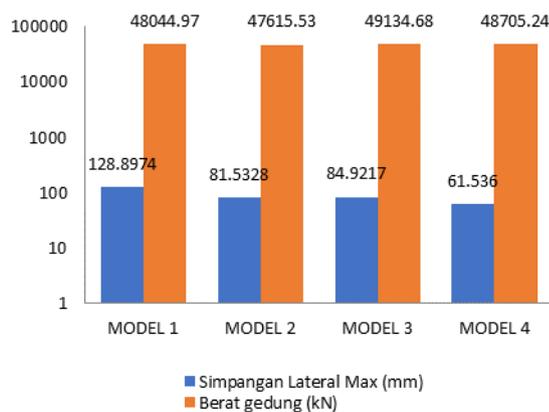
Pada model 2 dan 3 terjadi perpotongan grafik simpangan lateral, dari lantai dasar hingga lantai 5, model 2 memiliki nilai simpangan lateral per lantai yang lebih besar dari nilai simpangan lateral model 3, akan tetapi pada lantai 6 hingga lantai 8 gedung, nilai simpangan lateral per lantai gedung model 2 lebih kecil

dari gedung model 3.

Hasil perbandingan nilai simpangan lateral pada Gambar 12 menunjukkan bahwa penggunaan sistem *frame tube* dapat mengurangi nilai simpangan lateral pada model gedung sistem *waffle slab* yang menggunakan rangka biasa, Sistem *frame tube* meningkatkan kekakuan gedung dengan persentase pengurangan simpangan lateral sebesar 36,7%. Apabila dibandingkan dengan penggunaan balok penguat pada gedung rangka biasa yang dapat mengurangi simpangan lateral sebesar 34,1%, penggunaan sistem *frame tube* jauh lebih efektif mengurangi nilai simpangan lateral pada sistem *waffle slab*.

Gambar 11 yang menunjukkan grafik deformasi horisontal gedung pun menunjukkan penggunaan sistem *frame tube* memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan balok penguat pada rangka biasa. Pada ketinggian tengah hingga atas gedung sistem *frame tube* lebih kaku dibandingkan dengan sistem rangka biasa menggunakan balok penguat.

Model 4 sistem *frame tube* dengan balok penguat pada *waffle slab* menjadi model dengan struktur terkaku berdasarkan nilai simpangan lateral maksimum dan *story drift*. Nilai simpangan lateral maksimum selanjutnya dihubungkan dengan nilai berat bangunan. Hubungan nilai simpangan lateral maksimum dan berat bangunan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Hubungan simpangan lateral dan berat bangunan

Berdasarkan Gambar 13 diketahui bahwa nilai berat total gedung terkecil adalah gedung model 2 dengan berat total gedung sebesar 47615,53 kN, berat total gedung terbesar adalah gedung model 3 sebesar 49134,68 kN. Apabila dibandingkan terhadap model 1, model gedung yang berat total gedungnya berkurang hanyalah gedung model 2 dengan simpangan lateral maksimum sebesar 81,53 mm. Model gedung dengan berat total terbesar yaitu gedung model 3 memiliki nilai simpangan lateral sebesar 84,92 mm. Model gedung dengan simpangan lateral terkecil yaitu gedung model 4 memiliki berat total gedung sebesar 48705,24 kN. Sehingga berdasarkan hubungan simpangan lateral maksimum dan berat gedung, gedung model 2 adalah

model gedung paling efektif.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai analisis struktur gedung bertingkat menggunakan sistem struktur *frame tube* dan *waffle slab* didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan *frame tube* terbukti dapat mengurangi nilai simpangan lateral pada sistem *waffle slab* yaitu dari nilai simpangan lateral maksimum sebesar 128,90 mm menjadi 81,53 mm dengan persentase pengurangan yaitu sebesar 36,7%.
2. Penggunaan balok penguat pada sistem rangka biasa dapat mengurangi nilai simpangan lateral pada sistem *waffle slab* yaitu dari nilai simpangan lateral maksimum sebesar 128,90 mm menjadi 84,92 mm dengan persentase pengurangan yaitu sebesar 34,1%.
3. Penggunaan kombinasi *frame tube* dan balok penguat pada sistem *waffle slab* dapat mengurangi simpangan lateral maksimum sebesar 128,90 mm menjadi 61,54 mm dengan persentase pengurangan yaitu sebesar 52,3%.
4. Untuk mengurangi simpangan lateral pada penggunaan sistem *waffle slab* didapatkan hasil bahwa penggunaan *frame tube* lebih efisien dibandingkan dengan penggunaan *waffle slab* rangka biasa ataupun menggunakan balok penguat. Hal ini karena berat total masa bangunan dengan sistem *frame tube* adalah paling ringan yaitu 47615,53 kN.
5. Bangunan yang paling kaku adalah bangunan model 4 yaitu menggunakan sistem *frame tube* dan balok penguat dengan simpangan lateral maksimum 61,54 mm dengan persentase pengurangan simpangan lateral terhadap model 1 yaitu sebesar 52,3%.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diberikan saran antara lain:

1. Analisis ini belum memperhitungkan perhitungan pondasi, tangga, dan dimensi *joint*. Sebaiknya di kesempatan lain, studi seperti ini juga memperhitungkan pondasi, tangga, dan *joint* agar didapatkan hasil yang lebih akurat lagi.
2. Penelitian ini hanya menggunakan sistem struktur *frame tube*, untuk penelitian selanjutnya dapat digunakan sistem struktur penahan gaya lateral lain seperti *shearwall*, *tube in tube*, dan lain-lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Imran, Iswandi., dan Hendrik, F., 2010. *Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa*. ITB, Bandung.
- Jimmy S, Juwana. 2005. *Panduan Sistem Bangunan Tinggi Untuk Arsitek dan Praktisi Bangunan*. Erlangga, Jakarta.

- More, dkk. 2013. "Analytical Study of Different Types of Flat Slab Subjected to Dynamic Loading". *International Journal of Science and Research*. 2319-7064
- Nasution, Amrinsyah., 2009. *Analisis dan Desain Struktur Beton Bertulang*. ITB, Bandung
- Nawy, Edward G. 1998. *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. PT.Refika Aditama. Bandung
- Permadi. 2003. Sistem Struktur *Tube in Tube* dan Penerapannya pada Bangunan Tinggi. *NALARs*, 2: 35-49.
- Poerbo, Hartono. 2000. *Struktur dan Konstruksi Bangunan Tinggi*. Djambatan, Jakarta.
- Puspantoro, Benny. 1993. *Teori & Analisis Balok Grid*. Andi Offset Yogyakarta,
- Prasad, dkk. 2005. "Optimum Dimensions os Waffle Slab for Medium Size Floors". *Asian Journal of Civil Engineering*. 6: 3: 183-197.
- Sandelin, dkk. 2013. *The Stabilization of High-rise Buildings* Department of Engineering Science, Applied Mechanics, Civil Engineering, Uppsala University.
- Satriadi, Angga. 2013. "Analisis Perbandingan Simpangan Lateral dan Volume Material Antara Variasi Balok Grid Sejajar dan Diagonal Pada Bangunan Beton Bentang Lebar ". *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Sriwijaya*, 1: 1.
- Schueller, Wolfgang. 1997. *Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi*. Refika, Bandung.
- Schodek, Daniel L. 1999. *Struktur Gedung Edisi Kedua*. Erlangga, Jakarta.
- Sharma. 2015. "Analysis of Flat Slab and Waffle Slab in Multistorey Buildings using ETABS". *International Journal for Scientific Research & Development*. Vol. 3: 2321-0613.
- Tumilar, Steffie. 2015. *Perilaku Dan Sistem Struktur Pada Perencanaan Gedung Tinggi*. Seminar Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia.
- Vielma. 2009. "Seismic performance of waffled-slab floor buildings". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures and Buildings* 162. 169-182