

# Evaluasi Perbandingan Pembebanan Gempa pada Gedung Bertingkat serta Pengaruh Efek P-delta Terhadap Stabilitas Struktur Baja (Studi Kasus : Model Portal 2D 7, 9, 10, dan 15 Lantai)

*Comparison Evaluation of Earthquake Load in Multi-storey Buildings and P-Delta Effects on Steel Structure Stability*

*(Case Study : 2D portal models 7, 9, 10, and 15 storeys)*

**Nur Muhammad Iskandar Sugeha, Bagus Soebandono, Restu Faizah**

*Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*

**Abstrak.** Peraturan pembebanan gempa di Indonesia yang hingga saat ini digunakan, menyediakan dua metode pendekatan untuk menganalisis respons struktur akibat gempa yaitu metode ekuivalen statik dan dinamik (respon spektrum dan *time history*) dimana metode ekuivalen statik hanya dikhususkan untuk struktur yang relatif sederhana dan tidak direkomendasikan untuk struktur bertingkat tinggi sehingga untuk mengatasi keterbatasan tersebut dibutuhkan analisis secara dinamik. Pengaruh gaya lateral akibat gempa, juga dapat menyebabkan deformasi yang besar pada struktur gedung bertingkat tinggi, sehingga beban statik pada struktur yang terdistribusi menjadi gaya aksial pada kolom, akan memberikan pengaruh gaya tambahan yaitu pengaruh non-linier geometri (efek P-delta). Untuk itulah akan dilakukan sebuah penelitian tentang perbandingan respons struktur baja pada tipikal bangunan gedung bertingkat dengan model portal 2D terhadap gaya lateral gempa dengan metode ekuivalen statik dan *time history* serta pengaruh efek P-delta yang dianalisis dengan bantuan program SAP2000 V14.2.1 terhadap stabilitas struktur baja dan sambungan (*end-plate*) baja melalui variasi jumlah tingkat yaitu 7, 9, 10 dan 15 tingkat. Dari hasil penelitian, disimpulkan bahwa metode statik ekuivalen dapat digunakan pada model struktur 7 dan 9 tingkat karena memberikan hasil yang lebih besar dari metode dinamik *time history*. Akan tetapi, untuk model struktur 10 dan 15 tingkat, metode *time history* lebih direkomendasi karena memberikan hasil yang lebih besar sehingga dinilai lebih aman. Jika ditinjau dari pengaruh efek P-delta, struktur 7 tingkat memberikan hasil yang besar karena jarak antar kolom yang direncanakan relatif jauh. Hal ini menyebabkan beban yang terdistribusi pada kolom menjadi cukup besar sehingga ketika struktur berdeformasi akibat gaya lateral, pengaruh gaya tambahan akibat gaya aksial pada kolom akan mengalami peningkatan yang cukup besar. Model struktur 15 tingkat juga memberikan efek P-delta yang besar. Hal ini karena gaya aksial pada kolom yang menyebabkan efek P-delta, didasarkan pada distribusi beban struktur yang besar akibat tingkat gedung yang relatif tinggi. Pada model struktur 9 dan 10 tingkat, pengaruh efek P-delta yang terjadi tidak dominan besar sehingga dapat diabaikan.

Kata-kata kunci : Gempa bumi, ekuivalen statik, *time history*, respon spektrum, P-delta, kapasitas kolom, sambungan baja (*end-plate*)

**Abstract.** The standard for earthquake resistance regulations in Indonesia which until now have been used, provide two approaches to analyzing structural responses due to earthquakes, namely static equivalent method and dynamic methods (spectrum response and time history) where static equivalent methods are only specific to relatively simple structures and are not recommended for structures high-rise so that to overcome these limitations requires dynamic analysis. The influence of lateral forces due to earthquakes can also cause large deformations in the structure of high-rise buildings, so that the static load in structures distributed into axial forces in the column will provide additional force effects, namely the influence of non-linear geometry (P-delta effect). For this reason, a study of the comparison of steel structure responses to typical multi-storey buildings with 2D portal models to the lateral earthquake force with static equivalent method and time history and the effect of P-delta effects were analyzed with the help of SAP2000 V14.2.1 program on the stability of steel structures and steel end-plates through variations in the number of levels, namely 7, 9, 10 and 15 levels. From the results of the study, it was concluded that the equivalent static method can be used in the structure model 7 and 9 levels because it gives results greater than the dynamic time history method. However, for the 10 and 15 level structure models, the time history method is recommended because it provides greater results so that it is considered safer. If viewed from the effect of the P-delta effect, the 7-level structure gives great results because the planned distance between columns is

relatively far. This causes the distributed load in the column to be quite large so that when the structure is deformed due to lateral forces, the effect of additional forces due to axial forces in the column will experience a considerable increase. The 15-level structure model also provides a large P-delta effect. This is because the axial force in the column which causes the P-delta effect, is based on a large structural load distribution due to the relatively high level of the building. In the 9 and 10 level structure models, the effect of the P-delta effect that occurs is not so dominant that it can be ignored.

Keywords: earthquake, static equivalent, time history, spectrum response, P-delta, column capacity, steel connection (end-plate)

## 1. Pendahuluan

Secara geografis, Indonesia berada di wilayah pertemuan dari perbatasan tiga lempeng tektonik, yaitu lempeng Pasifik, lempeng Eurasia serta lempeng Australia. Sehingga Indonesia menjadi salah satu negara yang sangat rentan terhadap gempa bumi yang tidak dapat diperkirakan atau diprediksi. Salah satu dampak terburuk akibat fenomena alam ini adalah jatuhnya korban jiwa akibat keruntuhan sebuah bangunan yang pada umumnya adalah gedung bertingkat. Oleh karena itu dalam merencanakan gedung bertingkat, dibutuhkan analisis dan perencanaan yang cukup teliti serta sesuai dengan standar peraturan tahan gempa yang telah ditetapkan.

## 2. Analisis Pembebanan Gempa

Gempa bumi memiliki potensi yang dapat menyebabkan kerusakan yang sangat parah pada konstruksi bangunan gedung. Hal ini karena gaya gempa bersifat acak dan tidak dapat diprediksi, sehingga cukup sulit untuk memperkirakan kekuatan gempa yang terjadi. Beban gempa harus dimodelkan dengan teliti sehingga dapat memberikan perilaku yang nyata dari struktur dengan pemahaman yang jelas bahwa kerusakan dapat diperkirakan atau diproyeksi (Kazim dkk., 2017).

Pada tahun 2012, dikembangkan sebuah pedoman standar perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung yaitu SNI 1726:2012 dengan metode analisis pembebanan gempa yang direkomendasikan yaitu analisis statik ekuivalen dan analisis dinamik (respons spektrum dan *time history*).

### *Statik Ekuivalen*

Metode statik ekuivalen adalah metode yang paling sederhana dan membutuhkan sedikit upaya komputasi berdasarkan pada formulasi yang diberikan dalam kode praktik.

Pertama desain dasar geser dihitung untuk seluruh bangunan, dan kemudian didistribusikan pada sepanjang ketinggian bangunan. Gaya lateral di setiap tingkat lantai yang diperoleh, didistribusikan pada setiap individu elemen menahan beban lateral (Duggal, 2010).

Metode ini diizinkan pada sebagian besar kode praktik untuk bangunan rendah hingga menengah serta dimulai dengan estimasi beban geser dasar dan distribusinya pada setiap tingkat yang dihitung dengan menggunakan rumus sesuai peraturan yang ditetapkan. Oleh karena itu, analisis statik ekuivalen hanya dapat berfungsi dengan baik pada gedung bertingkat rendah hingga menengah tanpa mode *lateral-torsional* berganda yang signifikan, dimana hanya mode pertama yang dipertimbangkan (Bagheri dkk., 2012).

### *Respon Spektrum*

Respon spektrum adalah suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik antara periode getar struktur  $T$ , lawan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Respon-respon maksimum dapat berupa simpangan maksimum (*spectral displacement*) kecepatan maksimum (*spectral velocity*) atau percepatan maksimum (*spectral acceleration*) massa struktur *single degree of freedom* (SDOF) (Widodo, 2001).

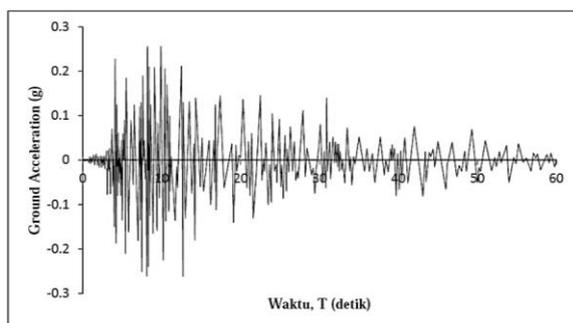
Tujuan mendasar metode ini adalah untuk mengevaluasi gaya yang disebabkan oleh aksi seismik pada struktur yang direncanakan dan menganalisis kapasitas struktur tersebut. Metode respon spektrum sangat didasarkan pada komputer dan pada teknik analisis struktural yang lebih baik. Distribusi gaya yang terjadi, didasarkan pada mode alami getaran, sehingga metode ini menjadi metode yang lebih tepat dan membutuhkan penentuan spektrum respon dari data aktivitas seismik yang terukur (Helou and Muhammad, 2014).

### **Time History**

Analisis riwayat waktu merupakan metode yang paling akurat dalam rekayasa seismic. Metode ini digunakan untuk mencari solusi integral pada dinamika struktural yang tergantung pada kinerja komponen struktur. Metode ini sangat cocok untuk memecahkan gaya yang memiliki pola tertentu dan dapat memperoleh secara akurat percepatan partikel, tegangan komponen serta perpindahan pada setiap titik waktu. Namun karena variasi yang dihasilkan tidak tentu dari aksi seismik, sehingga perlu mengurangi langkah integrasi untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat (Wu dkk., 2015).

Salah satu keunggulan dari metode ini yaitu dapat menganalisis respons struktural yang diketahui berada pada kondisi non-linier. Analisis ini juga merupakan analisis bertahap dari respons dinamis suatu struktur dari pemuatan tertentu yang dapat bervariasi seiring waktu. Analisis riwayat waktu digunakan untuk menentukan respon seismik dari muatan dinamis melalui representatif gempa yang sebenarnya (Patil and Kumbhar, 2013)

Penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan akselerogram gempa Yogyakarta pada tahun 2006, yang merupakan hasil replikasi gempa sebagai gempa masukan. Akselerogram gempa Yogyakarta tahun 2006 ditunjukkan melalui gambar 1.



Gambar 1. Akselerogram gempa Yogyakarta tahun 2006 hasil replikasi (Widodo, 2001)

Widodo (2001) menjelaskan bahwa, properti dinamika struktur yang dapat mempengaruhi respon struktur ketika dianalisis dengan metode riwayat waktu (*time history*) terhadap beban gempa yaitu terdiri dari massa bangunan, redaman dan kekakuan struktur.

### **3. Efek P-delta**

Efek P-Delta atau efek non-linieritas geometri adalah efek terjadinya penambahan gaya momen maupun geser pada elemen penampang akibat gaya aksial dari beban yang terdistribusi atau diberikan setelah penampang berdeformasi akibat gaya lateral yang disebabkan oleh beban gempa maupun angin (Akhter dkk., 2017).

Efek P-Delta didefinisikan sebagai momen destabilisasi yang sama dengan gaya gravitasi dikalikan dengan perpindahan lateral yang disebabkan oleh gaya lateral baik beban seismic akibat gempa maupun angin (Umashankar dan Nagaraja, 2016).

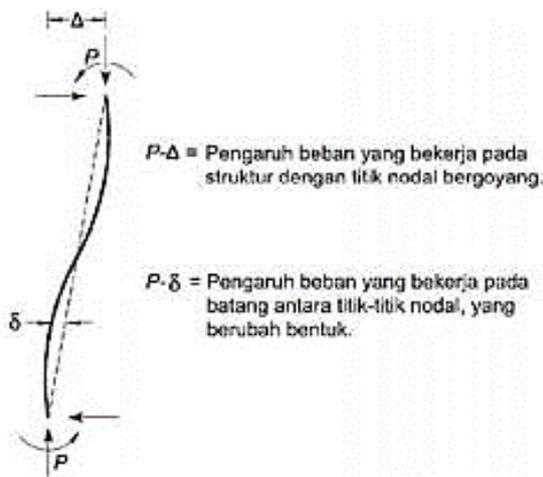
### **4. Analisis Struktur**

#### **Analisis Elastis Orde Pertama**

Deepak dan Arunkumar (2017) menjelaskan bahwa dalam hal perencanaan struktur bangunan, umumnya sebagian besar perencana cenderung menggunakan analisis statis linier yang juga dikenal sebagai analisis orde pertama (*first orde analysis*) untuk menghitung kekuatan desain, momen serta perpindahan yang disebabkan oleh beban yang bekerja pada struktur. Analisis statis linier dilakukan dengan asumsi defleksi kecil dimana kekuatan desain yang dihasilkan, momen serta perpindahan tidak memperhitungkan efek gaya tambahan karena titik noda elemen penampang di bawah beban aksial, tidak berdeformasi akibat beban lateral yang dipaksakan.

#### **Analisis Elastis Orde Kedua**

Dewobroto (2016) menjelaskan bahwa, Efek P-delta pada dasarnya adalah permasalahan stabilitas yang dapat menyebabkan tekuk. Meskipun strategi penyelesaiannya sendiri adalah non-linier geometri, tapi hasil akhir dipengaruhi tidak hanya oleh perubahan geometri atau deformasi akibat gaya yang terjadi, tapi juga bisa melalui faktor lainnya seperti ketidak-lurusan (*imperfection*) geometri struktur, reduksi kekakuan akibat adanya tegangan residu penampang, juga deformasi dari sambungan tipe *semi-rigid* yang perilaku sambungan tersebut tidak sepenuhnya kontinyu. Faktor efek P- $\Delta$  dan P- $\delta$  yang dievaluasi dapat dilihat melalui gambar 2 berikut.



Gambar 2. Parameter dari kurva  $\sigma$ - $\epsilon$  (Dewobroto, 2016)

## 5. Metode Analisis Struktur Baja

### Metode Panjang Efektif

Metode panjang efektif umumnya menyediakan desain yang baik dari struktur rangka. Namun, meskipun populer digunakan dimasa lalu hingga sekarang sebagai dasar untuk desain. Perubahan besar dalam AISC 360-2005 adalah dimasukkannya metode analisis langsung dimana faktor panjang efektif (faktor K) dianggap sebesar 1.0 serta menganalisis ketidak-sempurnaan penampang atau bahkan menggantinya dengan beban *notional*. Metode yang disederhanakan menggunakan analisis linear diperkenalkan dengan metode elastis orde pertama, dengan analisis struktural dalam kondisi *ekuilibrium* yang diformulasikan pada struktur yang tidak berdampak apapun, sehingga mengabaikan efek orde kedua (Ficanha and Pravia, 2015).

### Metode Analisis Langsung

Salah satu keunggulan dari metode analisis langsung yaitu dapat menganalisis momen sekunder yang diakibatkan oleh pengaruh efek non-linier geometri yaitu efek P-delta dengan cara analisis linier elastis orde kedua (*second order elastic analysis*). Meskipun tidak sama seperti jenis analisis yang realistis, tapi metode ini telah dibuktikan dengan cara kalibrasi melalui sebuah data percobaan, sehingga memberikan hasil yang lebih akurat serta mendekati nilai yang sebenarnya dari analisis yang lebih rumit, sehingga cukup efisien jika digunakan pada perencanaan dalam sebuah pekerjaan. (Dewobroto, 2016)

SNI 1729:2015 pada pasal (C2.2b) menjelaskan bahwa, beban *national* harus digunakan sebagai beban lateral pada semua level. Beban harus *national* harus ditambahkan ke beban lateral lainnya dan harus digunakan pada semua kombinasi beban. Besarnya beban *national* dapat dilihat melalui persamaan berikut.

$$N_i = 0,002 Y_i \quad (1)$$

dengan  $N_i$  adalah beban *national* pada tingkat- $i$  dan  $Y_i$  merupakan beban gravitasi pada tingkat- $i$  dari kombinasi pembebanan *LRFD*.

Penyesuaian yang tepat harus dibuat jika asumsi ini dilanggar. Metode ini menggunakan kekakuan lentur dan aksial yang dikurangi untuk diperhitungkan sifat kaku. Faktor 0,80 diterapkan untuk semua kekakuan dalam struktur. Faktor tambahan ( $\tau_b$ ) diterapkan untuk kekakuan lentur anggota yang berkontribusi pada stabilitas struktur (Ky dkk., 2014).

Untuk kondisi  $\alpha P_r / P_y \leq 0.5$

$$\tau_b = 1 \quad (2)$$

Untuk kondisi  $\alpha P_r / P_y > 0.5$  maka :

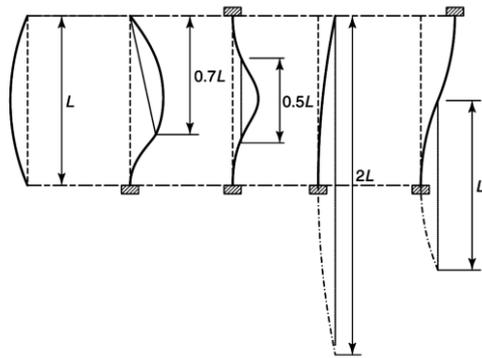
$$\tau_b = 4 \frac{\alpha P_r}{P_y} \left( 1 - \frac{\alpha P_r}{P_y} \right) \quad (3)$$

dengan  $\alpha$  sebesar 1,0 dan  $P_r$  adalah kekuatan tekan aksial-perlu menggunakan kombinasi beban *LRFD* (N).

### Konsep Kolom

Tekuk adalah fenomena ketidak-stabilan dalam sistem struktur yang mengalami beban kompresi. Dalam kolom, itu terkait dengan transisi dari konfigurasi lurus menuju keadaan terdeformasi lateral. Beban kritis menggambarkan beban dimana transisi ini terjadi dan dapat dihitung dengan memecahkan kesetimbangan kolom yang diubah secara lateral. Jika anggota elastis sempurna dan material mematuhi Hukum Hooke, maka teori defleksi menyatakan bahwa momen lentur sebanding dengan kelengkungan, dengan kekakuan lentur anggota sebagai konstanta proporsionalitas. (Webber dkk., 2015).

Dewobroto (2016) menjelaskan bahwa panjang efektif dihitung dari titik - titik belok (*inflection point*), yang disajikan melalui gambar 4 berikut.



Gambar 4. Visualisasi panjang efektif kolom (Dewobroto, 2016)

### Sambungan Baja (*End-Plate*)

Sambungan digunakan untuk elemen gabungan struktur pada suatu titik sehingga gaya dapat ditransfer diantara mereka dengan aman. Sifat mekanik dari koneksi memiliki pengaruh yang besar terhadap kekuatan dan stabilitas seluruh elemen penampang struktur. Jika desain koneksi tidak dipertimbangkan, maka dapat mengurangi kemudahan servis struktur karena defleksi yang besar. (De'nan dkk., 2017).

Sambungan baut tipe tarik terlihat sederhana meskipun demikian ada tambahan pelat khusus pada ujung batang, sistem tersebut disebut juga sebagai sambungan *end-plate*. Ketika terpasang komponen pelat ujung saling menempel rapat dengan pelat rawan, yang bisa berupa sambungan *end-plate* lain, atau pelat sayap profil kolom. (Dewobroto, 2016).

## 6. Metode Penelitian

### Model Struktur

Dalam penelitian ini digunakan model struktur portal dua dimensi yang diambil dari gambar rencana gedung bertingkat yang telah ada di lapangan. Model struktur tersebut dianalisis kembali menggunakan struktur baja dengan pembebanan gempa di daerah Yogyakarta. Terdapat empat model struktur yang berbeda sesuai jumlah tingkat, yaitu model portal 7 lantai, 9 lantai, 10 lantai dan 15 lantai

### Spesifikasi Bahan

Spesifikasi bahan material yang digunakan dalam penelitian ini, disajikan sebagai berikut :

- a. mutu baja BJ-37 dengan  $f_y = 240$  MPa dan  $f_u = 370$  MPa serta Modulus elastisitas ( $E_s$ ) = 200.000 MPa.
- b. beton bertulang (untuk pelat lantai) dengan berat jenis sebesar 2.400 kg/m<sup>3</sup>.

### Metode Analisis

Terdapat tiga penelitian yang akan dilakukan dengan metode yang digunakan yaitu sebagai berikut :

- a. Analisis statik ekuivalen di analisis secara manual dengan bantuan program *Microsoft Excel* mengacu pada standar SNI 1726:2012, dan analisis dinamik *Time History* menggunakan metode modal superposisi (*mode superposition method*) dengan bantuan program SAP2000).
- b. Analisis respons spektrum terhadap efek P-delta akibat beban angin dan gempa yang mengacu pada standar SNI 1726:2012 dengan bantuan program SAP2000.
- c. Kapasitas penampang kolom dan sambungan *end-plate* terhadap efek P-delta dihitung dengan metode analisis langsung (*direct analysis method*) dan metode panjang efektif (*effective length method*) yang mengacu pada standar SNI 1729:2015.

### Tahapan Analisis

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, penelitian yang dilakukan terdiri dari tiga penelitian. Untuk itu, akan diuraikan setiap tahapan dari penelitian tersebut :

- a. Perbandingan respons parameter gempa dengan analisis statik ekuivalen dan dinamik *time history*
  - 1) Menentukan bentuk model portal struktur gedung yang akan dianalisis dengan program SAP2000;
  - 2) Analisis statik ekuivalen terhadap beban gempa melalui standar SNI 1726:2012, dengan tahapan analisis sebagai berikut :
    - a) Kategori resiko berdasarkan fungsi bangunan, faktor keutamaan gempa ( $I_e$ ) dan nilai koefisien modifikasi respon ( $R$ ).
    - b) Periode fundamental pendekatan (T)
    - c) Gaya geser dasar seismik ( $V$ )
    - d) Distribusi gaya gempa berupa gaya horizontal tingkat ( $F_i$ ), gaya geser tingkat ( $V_i$ ), dan *displacement* ( $d_i$ )

- 3) Analisis dinamik *Time History* terhadap beban gempa melalui metode modal analisis (*mode superposition method*), dengan data akselerogram gempa Yogyakarta tahun 2006 hasil replikasi sebagai gempa masukan.
  - 4) Membuat grup dari setiap tingkat struktur
  - 5) Menampilkan respons parameter berupa *displacement* ( $d_i$ ), gaya horizontal tingkat ( $F_i$ ), gaya geser tingkat ( $V_i$ ) dan gaya geser dasar ( $V$ )
  - 6) Membandingkan hasil respons parameter terhadap beban gempa melalui metode statik ekuivalen dan metode dinamik *time history*
  - 7) Kesimpulan dan Saran.
- b. Perbandingan respons parameter gempa dengan analisis dinamik respons spektrum terhadap efek P-delta, dengan tahapan analisis sebagai berikut :
- 1) Input data respons spektrum yang telah dibuat berdasarkan data parameter dari peta  $MCE_R$  tahun 2011 di daerah Yogyakarta
  - 2) Mengaktifkan opsi pengaruh non-linier yaitu P-delta
  - 3) Membandingkan hasil respons parameter melalui metode analisis respons spektrum dengan modal analisis (*mode superposition method*), berupa *displacement* ( $d_i$ ), gaya horizontal tingkat ( $F_i$ ), gaya geser tingkat ( $V_i$ ) dan gaya geser dasar ( $V$ ) terhadap efek P delta dan tanpa efek P-delta
  - 4) Kesimpulan dan Saran.
- c. Perbandingan kapasitas kolom dan sambungan (*end-plate*) dengan metode analisis langsung dan metode panjang efektif terhadap efek P-delta dengan analisis respons spektrum.
- 1) Menghitung kuat tekan dan lentur kolom melalui standar SNI 1729:2015
  - 2) Modifikasi faktor panjang efektif (faktor K)
  - 3) Interaksi gaya aksial dan momen lentur.
  - 4) Menghitung kapasitas sambungan *end-plate* tipe lokal melalui standar SNI 1729:2015
  - 5) Membandingkan hasil perhitungan kapasitas penampang kolom dan sambungan *end-plate*
  - 6) Kesimpulan dan Saran.

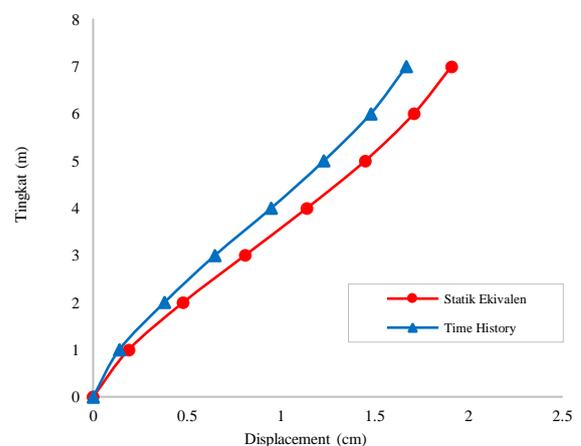
## 7. Hasil dan Pembahasan

Dari penelitian tentang perbandingan metode statik ekuivalen dan dinamik *time history*, diberikan kesimpulan sebagai berikut.

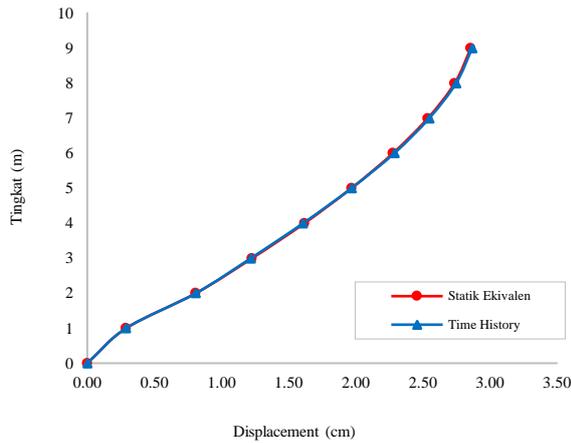
### *Displacement*

Gambar 5(a) menunjukkan hasil *displacement* yang terjadi pada model portal 7 tingkat dengan analisis statik ekuivalen memberikan hasil yang lebih besar, sehingga penggunaan metode statik ekuivalen lebih aman dibandingkan metode *time history*. Gambar 5(b) pada model portal 9 tingkat, dengan metode statik ekuivalen dan *time history* memberikan nilai yang sama. Sehingga dengan untuk kasus ini, bisa dianalisis dengan kedua metode tersebut. Gambar 5(c) pada model portal 10 tingkat, menunjukkan hasil dengan metode *time history* mulai memberikan nilai yang besar pada tingkat ke-5 hingga tingkat ke-9, sehingga penggunaan metode *time history* lebih direkomendasikan untuk digunakan.

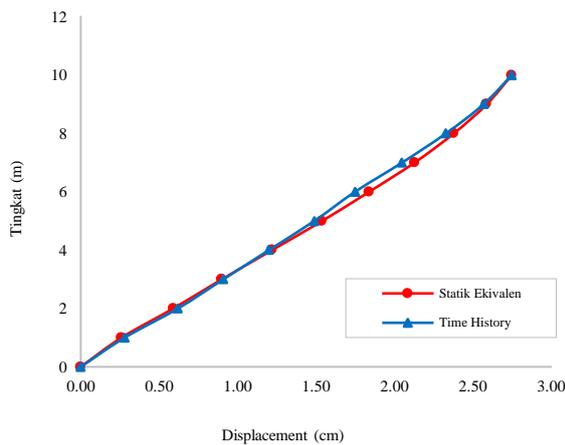
Melalui gambar 5(d) pada model portal 15 lantai, menunjukkan hasil dengan metode *time history* lebih besar dibandingkan metode statik ekuivalen, sehingga metode *time history* bisa menjadi metode yang lebih direkomendasikan untuk digunakan karena memberikan hasil yang lebih aman dibandingkan metode statik ekuivalen.



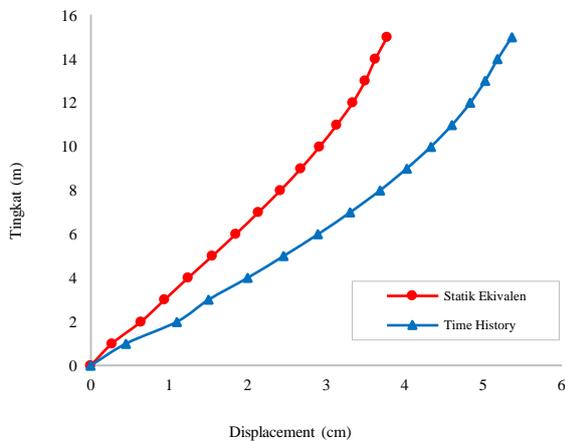
(a)



(b)



(c)



(d)

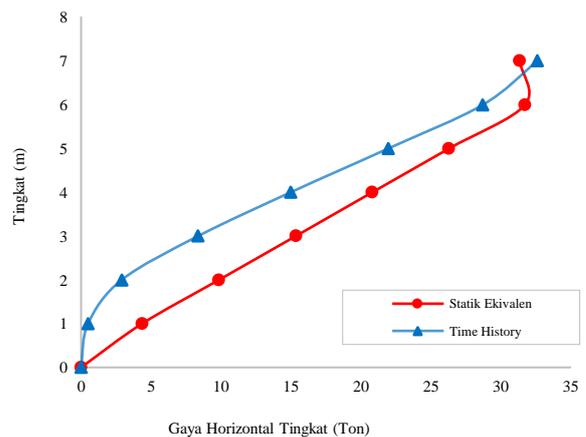
Gambar 5. Perbandingan hasil perhitungan *displacement* dengan metode ekuivalen statik dan dinamik *time history* (a) 7 tingkat, (b) 9 tingkat, (c) 10 tingkat, (d) 15 tingkat.

### Gaya Horizontal ( $F_i$ )

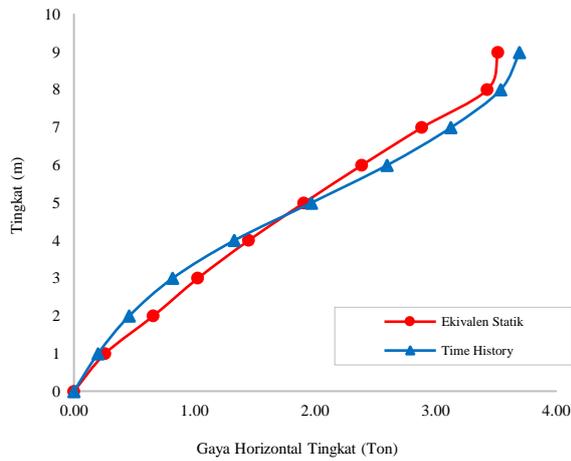
Gambar 6(a) pada model portal 7 tingkat, menunjukkan bahwa hasil dari metode statik ekuivalen lebih besar dibandingkan metode *time history*, sehingga penggunaan metode *time history* menjadi tidak aman untuk digunakan. Gambar 6(b) pada model portal 9 tingkat, menunjukkan hasil nilai dengan metode *time history* lebih besar pada tingkat ke-5 hingga tingkat ke-9. Akan tetapi pada tingkat ke-1 hingga tingkat ke-4, menunjukkan hasil dengan metode statik ekuivalen jauh lebih besar dibandingkan dengan metode *time history*, sehingga jika analisis dengan metode *time history* paksaan, akan mengakibatkan keruntuhan pada gedung dan dapat mempengaruhi tingkat di atasnya.

Gambar 6(c) pada portal 10 tingkat, menunjukkan bahwa dengan metode statik ekuivalen pada tingkat ke-4 hingga tingkat ke-7 memberikan nilai yang besar, tapi dengan metode *time history* pada tingkat ke-1 memberikan nilai yang besar jika dibandingkan dengan metode statik ekuivalen, sehingga potensi keruntuhan pada tingkat ke-1 yang dapat memberikan pengaruh besar pada tingkat di atasnya menjadi sebuah pertimbangan yang sangat penting untuk diperhatikan dalam perencanaan. Untuk itulah penggunaan metode *time history* dinilai lebih aman.

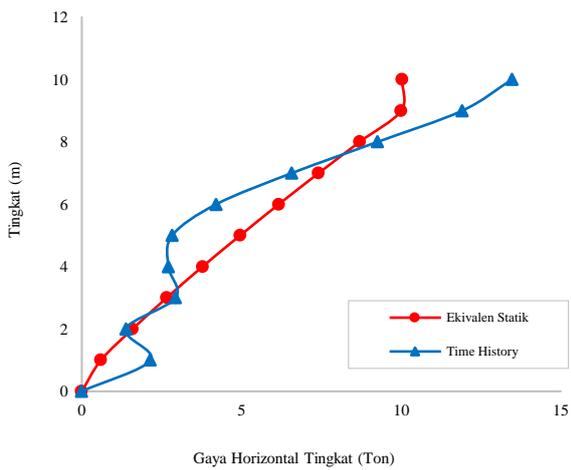
Melalui gambar 6(d) pada portal 15 lantai, menunjukkan bahwa hasil dari metode *time history* memberikan hasil yang dominan lebih besar dari setiap tingkat jika dibandingkan metode statik ekuivalen, sehingga penggunaan metode *time history* dinilai jauh lebih aman untuk digunakan.



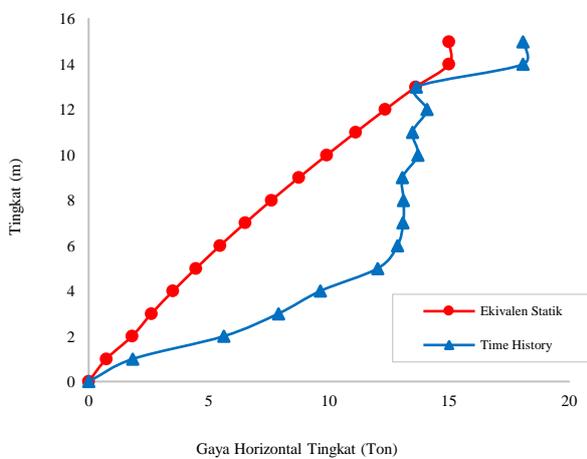
(a)



(b)



(c)



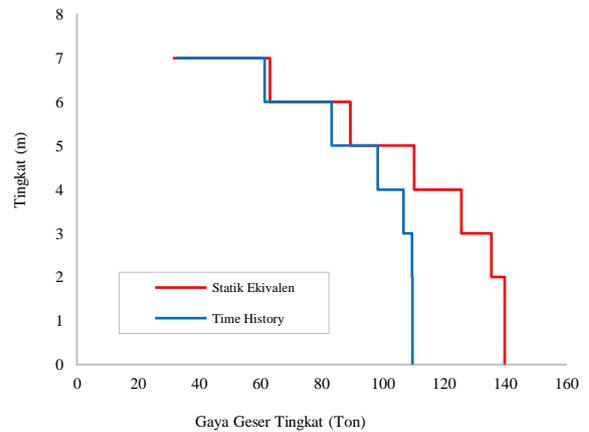
(d)

Gambar 6. Perbandingan hasil perhitungan gaya horizontal tingkat dengan metode ekuivalen statik dan dinamik *time history* (a) 7 tingkat, (b) 9 tingkat, (c) 10 tingkat, (d) 15 tingkat.

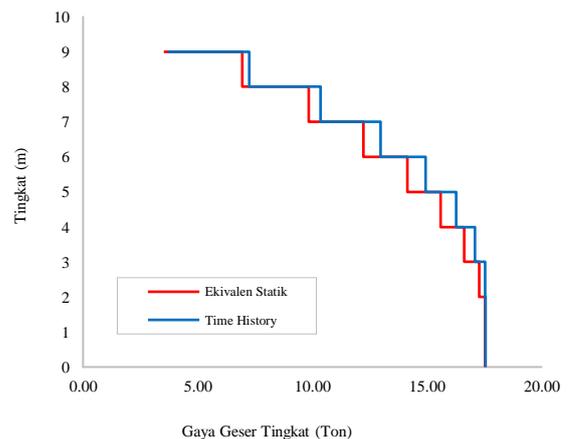
### Gaya Geser tingkat ( $V_i$ )

Gambar 7(a) pada portal 7 lantai, menunjukkan bahwa hasil dari metode statik ekuivalen pada tingkat ke-1 hingga tingkat ke-6 memberikan hasil yang dominan jauh lebih besar dibandingkan dengan metode *time history*, sehingga jika dipaksakan dengan menggunakan metode *time history* dapat berpotensi terjadi kerusakan yang cukup besar pada tingkat ke-1 hingga tingkat ke-6 dan dapat berpengaruh pada tingkat ke-7.

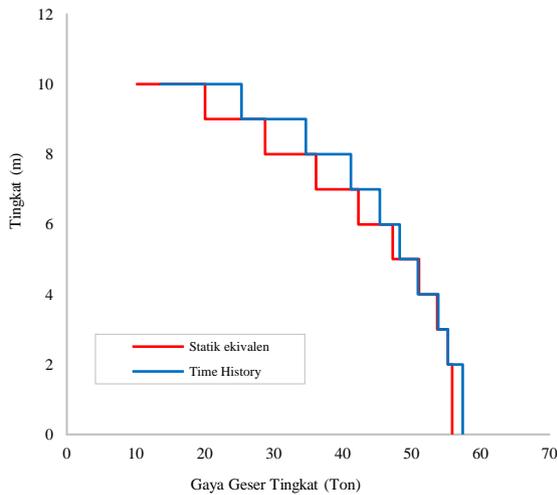
Gambar 7(b) dan 7(c) pada portal 9 dan 10 tingkat, menunjukkan bahwa hasil dari metode *time history* mulai memberikan nilai yang cukup besar sehingga menjadi lebih aman untuk digunakan dibandingkan metode statik ekuivalen. Gambar 7(d) pada portal 15 tingkat, menunjukkan bahwa hasil dari metode *time history* dominan lebih besar dibandingkan metode statik ekuivalen. Jika penggunaan analisis dengan metode statik ekuivalen tetap dipaksakan, struktur akan berpotensi terjadi keruntuhan yang besar pada setiap tingkat.



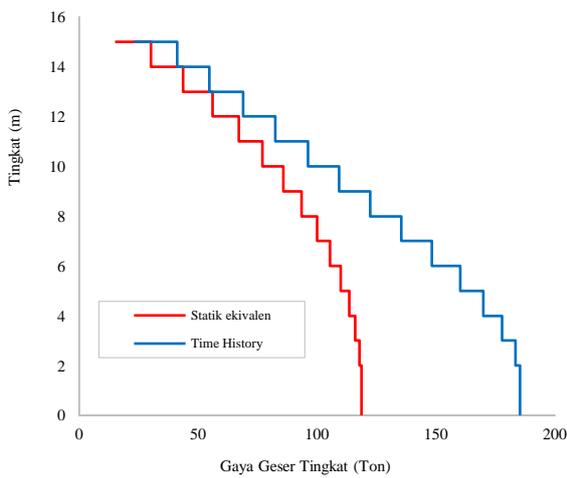
(a)



(b)



(c)

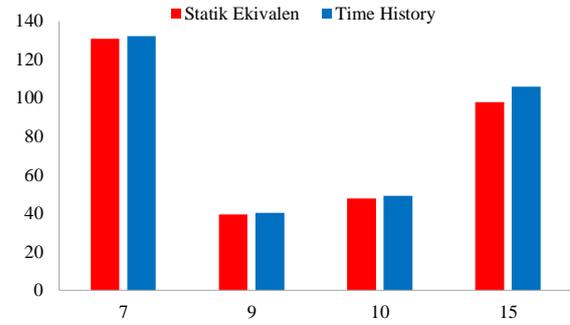


(d)

Gambar 7. Perbandingan hasil perhitungan gaya geser tingkat menggunakan metode ekuivalen statik dan dinamik *time history* (a) 7 tingkat, (b) 9 tingkat, (c) 10 tingkat, (d) 15 tingkat.

### Gaya Geser Dasar (V)

Melalui Gambar 8, menunjukkan dengan jelas bahwa bangunan lebih dari 10 tingkat dengan menggunakan metode *time history* menjadi lebih aman, kecuali pada portal kurang dari 10 tingkat, lebih direkomendasikan untuk menggunakan metode statik ekuivalen



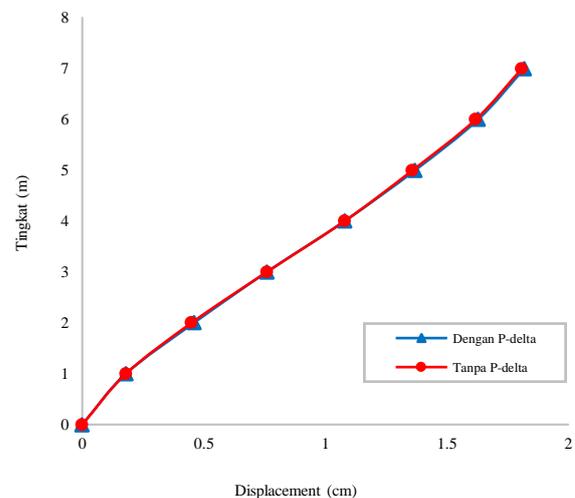
Gambar 8. Perbandingan hasil perhitungan gaya geser dasar menggunakan metode ekuivalen statik dan dinamik *time history*

Dari penelitian tentang perbandingan pengaruh efek P-delta dengan metode respons spektrum, diberikan kesimpulan sebagai berikut.

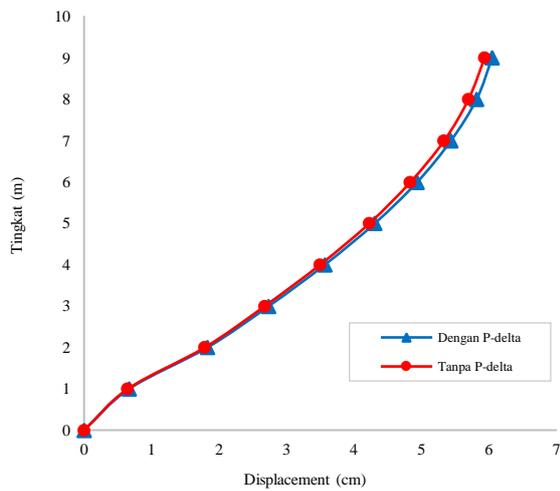
### Displacement ( $d_i$ )

Pada gambar 9(a) pada portal 7 tingkat, menunjukkan bahwa pengaruh efek P-delta tidak terlalu memberikan dampak terhadap struktur, sehingga dapat diabaikan. Gambar 9(b) dan 9(c), pengaruh efek P-delta mulai meningkat hingga 1%, akan tetapi dampak tersebut tidak memberikan pengaruh yang besar pada struktur bangunan, sehingga pengaruh efek P-delta dapat diabaikan.

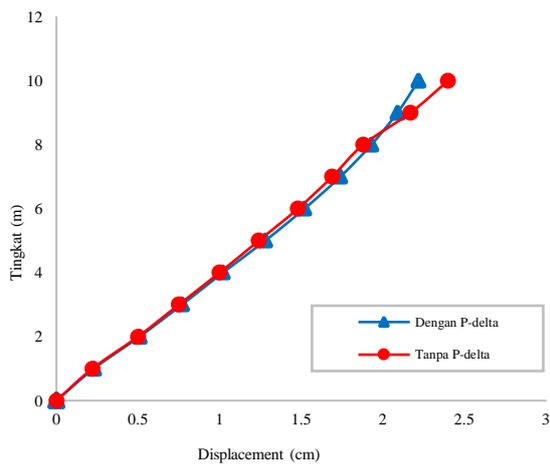
Pada gambar 9(d) pada portal 15 tingkat, pengaruh efek P-delta mulai memberikan dampak yang cukup besar pada struktur. *Displacement* yang terjadi meningkat hingga 10%, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaruh efek P-delta, tidak dapat diabaikan pada model portal 15 tingkat.



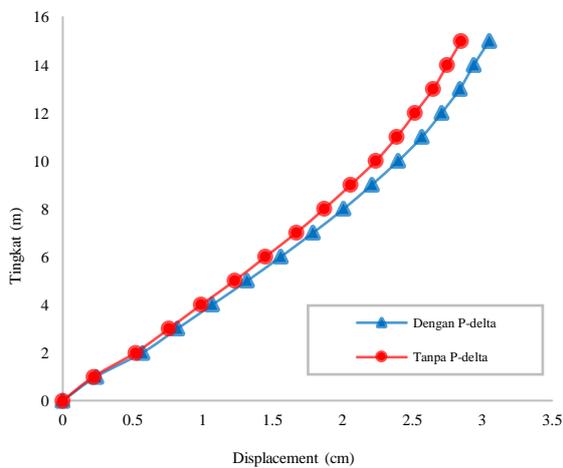
(a)



(b)



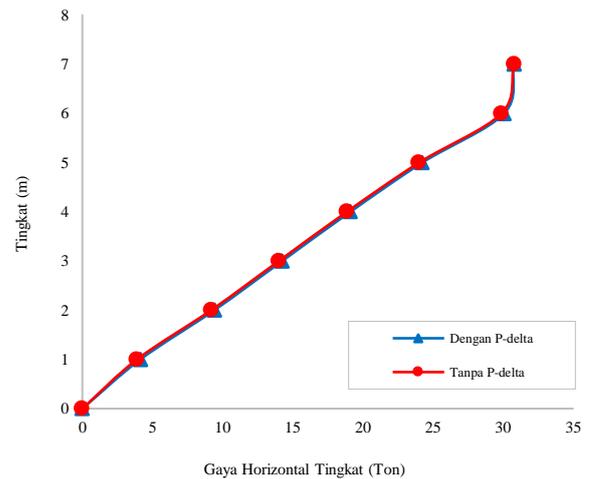
(c)



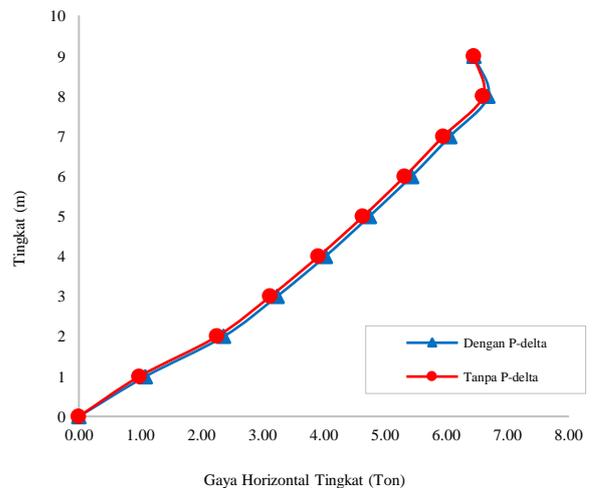
(d)

### Gaya horizontal tingkat ( $F_i$ )

Gambar 10(a), 10(b) dan 10(c) pada model struktur 7, 9 dan 10 lantai, pengaruh efek P-delta yang dianalisis tidak memberikan dampak yang cukup besar, sehingga pengaruh non-linier geometri tersebut dapat diabaikan. Akan tetapi, pada model struktur 15 lantai melalui gambar 10(d), pengaruh efek P-delta mulai memberikan peningkatan yang cukup besar terhadap gaya horizontal setiap tingkat struktur. Untuk itulah, pengaruh P-delta tidak dapat diabaikan dalam analisis pada model struktur 15 lantai

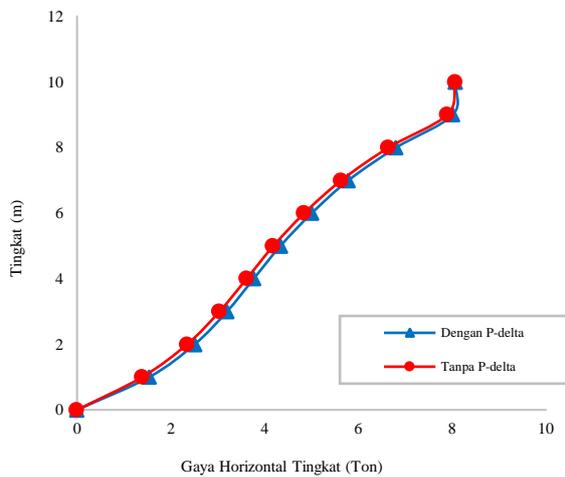


(a)

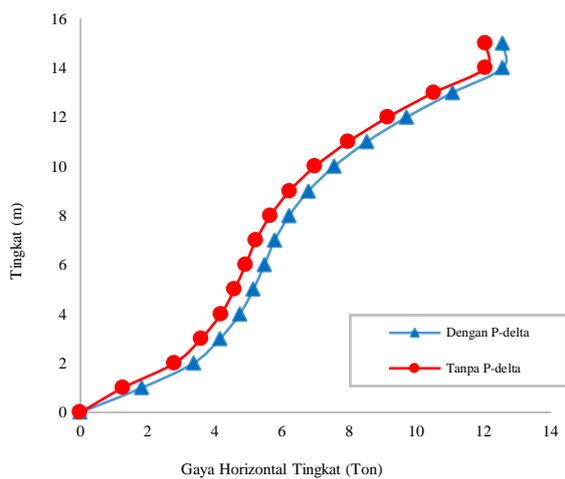


(b)

Gambar 9. Perbandingan hasil perhitungan *displacement* dengan dan tanpa efek P-delta melalui metode respons spektrum  
(a) 7 tingkat, (b) 9 tingkat, (c) 10 tingkat,  
(d) 15 tingkat.



(c)



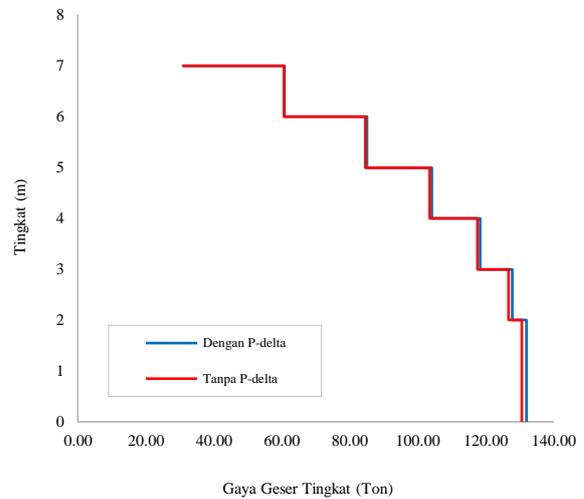
(d)

Gambar 10. Perbandingan hasil perhitungan gaya horizontal tingkat dengan dan tanpa efek P-delta melalui metode respons spektrum (a) 7 tingkat, (b) 9 tingkat, (c) 10 tingkat, (d) 15 tingkat.

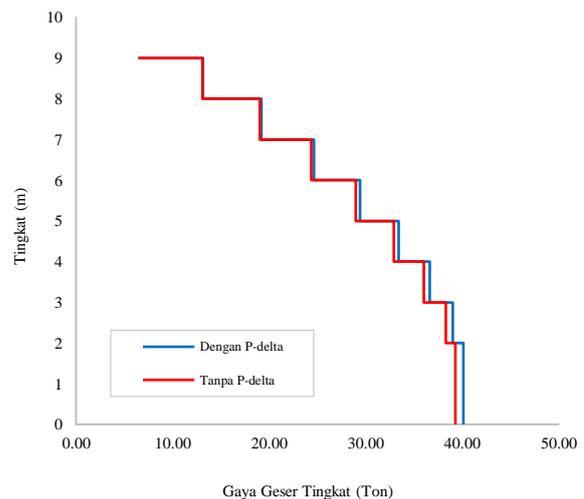
### Gaya geser tingkat ( $V_i$ )

Gambar 11(a) pada portal 7 tingkat, menunjukkan bahwa pengaruh efek P-delta memberikan pengaruh yang sedikit pada struktur sehingga dapat diabaikan. Akan tetapi, tidak untuk portal 9 tingkat melalui gambar 11(b), efek P-delta yang terjadi pada kasus portal 9 tingkat mulai memberikan peningkatan pada tingkat ke-1 hingga tingkat ke-6.

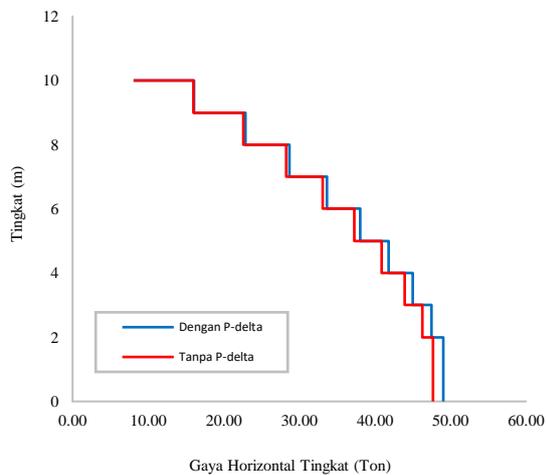
Pada model struktur 10 tingkat melalui gambar 11(c), pengaruh efek P-delta yang terjadi, meningkat cukup besar pada tingkat ke-1 hingga tingkat ke-7. Model struktur 15 tingkat melalui gambar 11(d) menunjukkan bahwa, pengaruh efek memberikan peningkatan yang besar pada setiap tingkat struktur, sehingga pengaruh non-linier tersebut tidak dapat diabaikan dalam perencanaan struktur 15 tingkat.



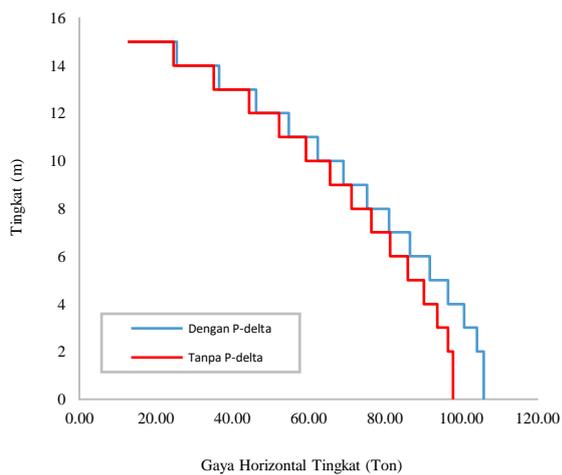
(a)



(b)



(c)



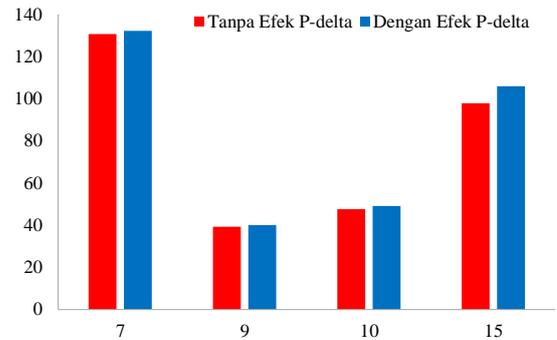
(d)

Gambar 11. Perbandingan hasil perhitungan gaya geser tingkat dengan dan tanpa efek P-delta melalui metode respons spektrum (a) 7 tingkat, (b) 9 tingkat, (c) 10 tingkat, (d) 15 tingkat.

### Gaya Geser Dasar (V)

Pada model struktur 7, 9 dan 10 tingkat melalui gambar 12, efek P-delta yang terjadi relatif sedikit sehingga dapat diabaikan. Akan tetapi pada model struktur 15 tingkat, pengaruh efek P-delta tidak dapat diabaikan karena memberikan hasil yang cukup besar.

Melalui Gambar 12, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi tingkat struktur yang direncanakan, maka pengaruh efek P-delta terhadap gaya geser akan semakin meningkat, sehingga perlu adanya pertimbangan dalam perencanaan terhadap pengaruh efek P-delta.



Gambar 12. Perbandingan hasil perhitungan gaya geser dasar dengan dan tanpa efek P-delta melalui metode respons spektrum

Dari penelitian tentang perbandingan metode analisis langsung dan metode panjang efektif terhadap kapasitas kolom, disajikan melalui tabel 17 dan 18 berikut.

Tabel 17. Kapasitas penampang kolom dengan metode panjang efektif terhadap efek P-delta

Tingkat ke-	Kapasitas tekan (kN)	Kapasitas momen (kN.m)	Rasio (%)
7	3.937,48	954,89	0,39
9	3.818,61	954,89	0,37
10	4.794,34	1.349,74	0,25
15	5.910,38	2.197,62	0,21

Tabel 18. Kapasitas penampang kolom dengan metode analisis langsung terhadap efek P-delta

Tingkat ke-	Kapasitas tekan (kN)	Kapasitas momen (kN.m)	Rasio (%)
7	3.720,36	954,89	0,41
9	3.494,76	954,89	0,37
10	4.507,78	1.349,74	0,25
15	5193,92	2.197,62	0,23

Tabel diatas menunjukkan bahwa rasio yang diberikan pada tingkat ke-7 dengan metode analisis langsung, memberikan hasil yang lebih besar. Hal ini terjadi karena jarak antar kolom yang relatif jauh sehingga menyebabkan beban yang terdistribusi pada balok menjadi cukup besar. Faktor tersebut yang menyebabkan terjadinya peningkatan terhadap pengaruh efek P-delta.

Pada tingkat ke-9 dan 10, rasio yang diberikan sama besar, sehingga metode analisis langsung dan metode panjang efektif dapat digunakan. Akan tetapi, pada tingkat ke-15 melalui tabel 5.17 dan 5.18, terjadi peningkatan terhadap rasio yang diberikan akibat pengaruh

efek P-delta, sehingga lebih direkomendasikan menggunakan metode analisis langsung.

Dari penelitian tentang perbandingan metode analisis langsung dan metode panjang efektif terhadap kapasitas sambungan baja (*end-plate*), disajikan melalui tabel 19 dan 20.

Tabel 19. Kapasitas sambungan *end-plate* tanpa efek P-delta

Tingkat ke-	Momen Lentur (kN.m)	Kapasitas Momen (kN.m)	Diameter baut	Jumlah baut
7	102,95	180,09	20	8
9	151,10	180,09	20	8
10	93,23	180,09	20	8
15	26,48	180,09	20	8

Tabel 20. Kapasitas sambungan *end-plate* dengan efek P-delta

Tingkat ke-	Momen Lentur (kN.m)	Kapasitas Momen (kN.m)	Diameter baut	Jumlah baut
7	104,38	180,09	20	8
9	158,67	180,09	20	8
10	254,03	289,00	24	20
15	285,25	289,00	24	20

Melalui tabel 19, kapasitas momen yang diterima pada sambungan baik pada model portal 7 hingga 15 tingkat, dapat dengan menggunakan sambungan baut berukuran 20 mm sebanyak 8 baut. Akan tetapi, ketika pengaruh efek P-delta dianalisis (tabel 5.20) pada model portal 10 dan 15 tingkat, dampak efek P-delta tersebut terhadap momen pada sambungan, meningkat cukup besar sehingga baut berukuran 8 mm dengan jumlah 8 baut dinilai tidak aman. Untuk itu, perlu adanya pertimbangan dalam penambahan jumlah baut atau mengganti ukuran diameter baut.

## 8. Kesimpulan

a. Melalui Perbandingan terhadap respons parameter baik berupa *displacement*, gaya horizontal tingkat, gaya geser tingkat dan gaya geser dasar (*baseshear*) yang terjadi pada setiap model struktur yang direncanakan, dapat disimpulkan bahwa analisis dengan metode statik ekuivalen lebih direkomendasikan pada model struktur 7 lantai karena memberikan hasil yang lebih baik. Akan tetapi, pada model struktur 9, 10 dan 15 lantai, penggunaan analisis dengan metode statik ekuivalen memberikan hasil yang tidak akurat, sehingga lebih

direkomendasikan analisis secara dinamik karena memberikan hasil yang lebih akurat sehingga dinilai lebih aman.

- b. Berdasarkan hasil penelitian terhadap pengaruh efek P-delta pada bangunan gedung bertingkat terhadap beban angin dan gempa melalui respon spektrum, memberikan kesimpulan bahwa semakin tinggi tingkat struktur gedung yang direncanakan, maka pengaruh efek P-delta akan semakin meningkat. Hal ini dibuktikan melalui penelitian yang telah dilakukan dimana pengaruh efek P-delta pada model portal 9 tingkat, hampir tidak memberikan dampak terhadap efek P-delta. Akan tetapi, ketika dianalisis pada model portal 10 hingga 15 tingkat, pengaruh efek P-delta mulai memberikan dampak yang cukup signifikan. Hal ini juga terjadi pada model portal 7 tingkat dimana jarak antar kolom yang jauh serta berat beban yang terdistribusi pada struktur sehingga memberikan gaya tambahan yang besar.
- c. Pengaruh efek P-delta yang telah terjadi melalui penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, melalui modal portal 15 tingkat lebih direkomendasikan dianalisis dengan menggunakan metode analisis langsung, karena dinilai memberikan hasil yang akurat dibandingkan metode panjang efektif.
- d. Pengaruh efek P-delta juga berpengaruh cukup besar terhadap gaya pada sambungan struktur. Hal ini telah dibuktikan melalui penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Gaya momen tambahan yang diakibatkan oleh efek P-delta akan sangat berpengaruh terhadap penentuan dimensi dan jumlah sambungan baut yang akan direncanakan.

## 9. Daftar Pustaka

- AISC, 2005, 360-05: *Specification for Structural Steel Buildings*, AISC International, Illinois.
- AISC, 2010, 360-10: *Specification for Structural Steel Buildings*, AISC International, Illinois.
- Akhter, R., Prakash, S. dan Baig, M. A., 2017, P-Delta Effect on High Rise Building Subjected to Earth Quake and Wind Load, *International Journal of Engineering Science and Computing*, 7(8), 14441-14445.

- Bagheri, B., Firoozabad, E. S. dan Yahyaei, M., 2012, Comparative Study of the Static and Dynamic Analysis of Multi-Storey Irregular Building, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 6(11), 1045-1049.
- BSN, 2015, SNI 1729:2015: *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2013, SNI 1727:2013: *Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung dan Bangunan Lain*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2012, SNI 1726:2012: *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2002, SNI 03-1726-2002: *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Deepak, G. dan Arunkumar, B. N., 2017, P-Delta Analysis in the Design of Tall RC Structures, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(6), 2254-2258.
- De'nan, F., Hasan, H. dan Mahzuz, M., 2017, Behaviour of the Beam to Column Connection for Tapered Steel Section with Perforation, *Engineering Heritage Journal*, 1(1), 41-44.
- Dewobroto, W., 2016, *Struktur Baja Edisi ke-2*, Lumina Press, Jakarta.
- Duggal, S. K., (2010), *Earthquake Resistance Design of Structure Fourth Edition*, Oxford University Press, New Delhi.
- Ficanha, R. dan Pravia, Z. M. C., 2015, Second Order Analysis of Three Dimensional Steel Industrial Buildings, *Ciência & Engenharia / Science and Engineering Journal*, 24(2), 01 – 08.
- Helou, S. H. dan Muhammad, I., 2014, Equivalent Lateral Load Method vs. Response Spectrum Analysis Which Way is Forward, *Asian Journal of Engineering and Technology*, 2(5), 366-374.
- Kazim, A. V., Anwar, S. F. dan Hashmart, M., 2017, Seismic Analysis of Irregular (L-Shaped) RCC Building, *Journal for Research*, 2(12), 16-18.
- Ky, V. S., Lenwari, A. dan Thepchatri, T., 2015, Optimum Design of Steel Structure in Accordance with AISC 2010 Specification Using Heuristic Algorithm, *Engineering Journal*, 19(4), 71-81.
- Patil, A. S. dan Kumbhar, P. D., 2013, Time History Analysis of Multistoried RCC Building for Different Seismic Intensities, *International Journal of Structure and Civil Engineering Research*, 2(3), 194-201.
- Umashankar, P. G. H. dan Nagaraja, S., 2016, Stability Analysis of Steel Frame Structure: P-Delta Analysis, *International Journal for Scientific Research & Development*, 4(10), 743-746.
- Webber, A., Orr, J. J. dan Crothers, K., 2015, The Effective Length of Columns in Multi-Storey Frames, *Engineering Structure*, 102, 132-143.
- Widodo, P., 2001, *Respon Dinamik Struktur Elastik*, Universitas Islam Indonesia Press, Yogyakarta.
- Wu, X., Lu, H., Huang, K., Wu, S. dan Qiao, W., 2015, Frequency Spectrum Method-Based Stress Analysis for Oil Pipelines in Earthquake Disaster Areas, *Public Library of Science (PLOS) One*, 10(2), 1-24.